

Giancarlo Zibetti Mantovani

**ESTRUTURAS DE MADEIRA: USO DO ULTRASSOM NA  
LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS**

Trabalho de conclusão de curso  
submetido ao Departamento de  
Engenharia Civil da Universidade  
Federal de Santa Catarina como parte  
dos requisitos para a obtenção do Título  
de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ângela do Valle

Florianópolis  
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Mantovani, Giancarlo Zibetti

Estruturas de madeira : uso do ultrassom na localização  
de defeitos / Giancarlo Zibetti Mantovani ; orientadora,  
Ângela do Valle - Florianópolis, SC, 2014.  
136 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.  
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Madeira. 3. Defeitos. 4.  
Mapeamento. 5. Ultrassom. I. Valle, Ângela do. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia Civil. III. Título.

Giancarlo Zibetti Mantovani


**ESTRUTURAS DE MADEIRA: USO DO ULTRASSOM NA  
LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil, e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 10 de Junho de 2014.

Prof. Luis Alberto Gómez, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**



---

Prof.ª Angela do Valle, Dr.ª

Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.ª Poliana Dias de Moraes, Dr.ª  
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Lourenço Panosso Perlin, Me.  
Universidade Federal de Santa Catarina





Dedico este trabalho a todos que me acompanharam durante essa incrível e inesquecível jornada, em especial à minha mãe.



## AGRADECIMENTOS

Em especial à minha família, que sempre me apoiou e me incentivou nos meus estudos. Agradeço ainda a minha namorada Marcela, que sempre me fez mais forte e mais feliz, e que também me auxiliou em alguns ensaios.

À minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Ângela pela sua dedicação nessa importante etapa da minha vida. Também agradeço a todos os professores que contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação, em especial ao Prof. Lourenço, que prontamente me auxiliava quando surgiam as mais variadas dúvidas, e à Prof.<sup>a</sup> Poliana.

Ao meu amigo e conselheiro Manuel Manríquez Figueroa, com o qual muito aprendi durante minha permanência no GIEM – Grupo Interdisciplinar de Estudos da Madeira. Agradeço também a todos os membros do GIEM, pela companhia e auxílio fornecido no desenvolvimento desse trabalho e pelo fornecimento da madeira e da infraestrutura.

Ao LEE – Laboratório de Experimentação em Estruturas – e ao GPEND – Grupo de Pesquisa em Ensaios Não Destrutivos – pela disponibilidade da infraestrutura e dos equipamentos.



Obstáculos são aqueles perigos que você vê  
quando tira os olhos de seu objetivo.  
(Henry Ford, s.d.)



## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a sensibilidade da técnica de propagação de ondas ultrassônicas na localização de defeitos em elementos de madeira, especificamente na determinação da posição de nós, como também em avaliar a influência de determinados fatores na propagação de tais ondas na madeira. Para tal, inicialmente efetuou-se uma revisão bibliográfica sobre os principais fatores que influenciam a propagação de ondas ultrassônicas na madeira, inclusive sobre a influência provocada pela presença de não homogeneidades. Após, realizou-se o mapeamento com leituras ultrassônicas transversais diretas e longitudinais diretas e indiretas de quatro elementos estruturais de madeira, sendo dois da espécie *Pinus elliottii* (5 cm x 11 cm x 300 cm e 7 cm x 15 cm x 300 cm) e dois da espécie *Hymenolobium petraeum* (5 cm x 11 cm x 300 cm e 7 cm x 15 cm x 300 cm). Com o propósito de avaliar a sensibilidade do ultrassom na detecção de nós nos corpos de prova de *Pinus elliottii*, fez-se uma comparação a partir dos resultados obtidos com as leituras transversais diretas por meio de duas análises distintas. Uma análise foi baseada em diferenças entre leituras adjacentes ao longo desses corpos de prova e outra foi baseada na diferença entre uma leitura de referência (correspondente a uma região de madeira isenta de defeitos) e as demais leituras obtidas. Concluiu-se para a análise das leituras transversais diretas que o método da leitura de referência obteve melhor desempenho na classificação de regiões nesses elementos, do que o método das leituras adjacentes.

**Palavras-chave:** defeitos, madeira, mapeamento, ultrassom.





## ABSTRACT

The main objective of this research relies on the evaluation of the sensibility of ultrasonic wave propagation when used to locate flaws in wood profiles, specifically in order to define the position of knots and the influence of different factors related to the propagation of such waves in wood. Starting with a literature review about the main factors that influence the ultrasonic waves propagation in wood, including the ones caused by inhomogeneities. Then with direct transverse and direct longitudinal ultrasonic mapping of four wood profiles, two from the *Pinus elliottii* species (5 cm x 11 cm x 300 cm e 7 cm x 15 cm x 300 cm) and the other two from the *Hymenolobium petraeum* species (5 cm x 11 cm x 300 cm e 7 cm x 15 cm x 300 cm). In order to evaluate the sensibility of the ultrasound in the detection of knots in the specimens from the *Pinus elliottii* species, a comparison was made from the results obtained with direct transversal readings between two distinct analyses. One analysis was based on the differences between adjacent readings of this specimens and the other was based on the differences between a reference reading (that corresponds to a wood region free of flaws) and the other readings obtained. The results show that when analyzing wood profiles with direct transversal readings, the reference reading method managed to deliver better performance than the adjacent readings method in classifying the regions of the profiles.

**Keywords:** flaws, wood, mapping, ultrasound.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção transversal de um tronco.....	32
Figura 2 – Estrutura celular de resinosas (a) e folhosas (b) .....	33
Figura 3 – Eixos ortotrópicos e planos de referência da madeira.....	35
Figura 4 – Inspeção de elemento de madeira pelo método das ondas de tensão.....	39
Figura 5 – Diagrama de um sistema de medidas com ultrassom.....	41
Figura 6 – Esquemas típicos de leituras com ultrassom: (a) direta; (b) semidireta; (c) indireta.....	42
Figura 7 – Relação entre a velocidade ultrassônica e a densidade (5 espécies) .....	45
Figura 8 – Relação entre a velocidade ultrassônica e a densidade (geral) .....	45
Figura 9 – Efeito da umidade na atenuação e na velocidade ultrassônica.....	47
Figura 10 – Relação entre o teor de umidade e a velocidade ultrassônica paralela e perpendicular às fibras .....	48
Figura 11 – Influência da temperatura na velocidade paralela às fibras.....	49
Figura 12 – Influência da seção transversal na determinação da velocidade ultrassônica para a madeira da espécie <i>Pinus spruce</i> .....	50
Figura 13 – Variação da velocidade de propagação de ondas longitudinais diretas em função da relação $L/\lambda$ .....	51
Figura 14 – Influência da frequência na velocidade ultrassônica .....	52
Figura 15 – Equipamento (a) e gráficos de contorno do tempo de percurso das ondas, mostrando a estreita correlação com uma imagem real da peça (b) .....	54
Figura 16 – Tempo de transmissão da onda em função da posição.....	55
Figura 17 – Peças de pinus e angelim pedra utilizadas na pesquisa .....	57
Figura 18 – Esquema das seções transversais dos elementos.....	58
Figura 19 – Mapeamento dos corpos de prova.....	59
Figura 20 – PUNDIT 6.....	61
Figura 21 – Transdutores de 200 kHz, 54 kHz e 30 kHz .....	61
Figura 22 – Ensaio A-A': posicionamento dos transdutores. ....	63
Figura 23 – Ensaio B e B' / C e C' fixo: posicionamento dos transdutores. ....	63
Figura 24 – Ensaio B e B' / C e C' móvel: posicionamento dos transdutores. ....	64
Figura 25 – Ensaio B-B' / C-C': posicionamento dos transdutores .....	65
Figura 26 – Ensaio fenda transversal: etapas (em escala). ....	67

Figura 27 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 30 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 5 cm x 11 cm x 300 cm.....	72
Figura 28 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C' - 200 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 7 cm x 15 cm x 300 cm .....	73
Figura 29 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 200 kHz - <i>Hymenolobium petraeum</i> 5 cm x 11 cm x 300 cm.....	75
Figura 30 – Velocidade transversal direta B-B' - 200 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 5 cm x 11 cm x 300 cm.....	78
Figura 31 – Velocidade transversal direta C-C' - 200 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 5 cm x 11 cm x 300 cm.....	79
Figura 32 – Velocidade transversal direta C-C' - 30 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 5 cm x 11 cm x 300 cm.....	80
Figura 33 – Velocidade transversal direta B-B' - 200 kHz - <i>Hymenolobium petraeum</i> 7 cm x 15 cm x 300 cm.....	82
Figura 34 – Velocidade transversal direta C-C' - 200 kHz - <i>Hymenolobium petraeum</i> 7 cm x 15 cm x 300 cm.....	82
Figura 35 – Tempo de propagação da onda em função da profundidade da fenda transversal obtido através de leituras indiretas .....	86
Figura 36 – Análise das leituras adjacentes C-C' - 200 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	88
Figura 37 – Análise das leituras adjacentes C-C' - 200 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	89
Figura 38 – Análise leitura adjacente $\Delta t_{\text{ótimo}}$ - 200 kHz - <i>Pinus elliotti</i> ....	90
Figura 39 – Análise leitura adjacente $\Delta t_{\text{ótimo}}$ - 54 kHz - <i>Pinus elliottii</i> . ....	91
Figura 40 – Análise das leituras de referência C-C' - 200 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	94
Figura 41 – Análise das leituras de referência C-C' - 200 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	95
Figura 42 – Análise leitura de referência $\Delta t_{\text{ótimo}}$ - 200 kHz - <i>Pinus elliottii</i> .....	96
Figura 43 – Análise leitura de referência $\Delta t_{\text{ótimo}}$ - 54 kHz - <i>Pinus elliottii</i> .....	97
Figura 44 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 200 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	107
Figura 45 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 54 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	107
Figura 46 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 30 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	107
Figura 47 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 200 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	108

Figura 48 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 54 kHz - Pinus elliotii 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	108
Figura 49 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 30 kHz - Pinus elliotii 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	108
Figura 50 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C' - 200 kHz - Pinus elliotii 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	109
Figura 51 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C' - 54 kHz - Pinus elliotii 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	109
Figura 52 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C' - 30 kHz - Pinus elliotii 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	109
Figura 53 – Velocidade transversal direta B-B' - 200 kHz - Pinus elliotii 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	110
Figura 54 – Velocidade transversal direta B-B' - 54 kHz - Pinus elliotii 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	110
Figura 55 – Velocidade transversal direta B-B' - 30 kHz - Pinus elliotii 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	110
Figura 56 – Velocidade transversal direta C-C' - 200 kHz - Pinus elliotii 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	111
Figura 57 – Velocidade transversal direta C-C' - 54 kHz - Pinus elliotii 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	111
Figura 58 – Velocidade transversal direta C-C' - 30 kHz - Pinus elliotii 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	111
Figura 59 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) B e B' - 200 kHz - Pinus elliotii 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	112
Figura 60 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) B e B' - 54 kHz - Pinus elliotii 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	112
Figura 61 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) C e C' - 200 kHz - Pinus elliotii 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	113
Figura 62 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) C e C' - 54 kHz - Pinus elliotii 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	113
Figura 63 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 200 kHz - Pinus elliotii 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	114
Figura 64 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 54 kHz - Pinus elliotii 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	114
Figura 65 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 200 kHz - Pinus elliotii 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	115
Figura 66 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 54 kHz - Pinus elliotii 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	115
Figura 67 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C' - 200 kHz - Pinus elliotii 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	116

Figura 68 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C' - 54 kHz - Pinus elliottii 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	116
Figura 69 – Velocidade transversal direta B-B' - 200 kHz - Pinus elliottii 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	117
Figura 70 – Velocidade transversal direta B-B' - 54 kHz - Pinus elliottii 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	117
Figura 71 – Velocidade transversal direta C-C' - 200 kHz - Pinus elliottii 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	118
Figura 72 – Velocidade transversal direta C-C' - 54 kHz - Pinus elliottii 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	118
Figura 73 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 200 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	119
Figura 74 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 54 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	119
Figura 75 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 30 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	119
Figura 76 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 200 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	120
Figura 77 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 54 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	120
Figura 78 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 30 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	120
Figura 79 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C' - 200 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	121
Figura 80 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C' - 54 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	121
Figura 81 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C' - 30 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	121
Figura 82 – Velocidade transversal direta B-B' - 200 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	122
Figura 83 – Velocidade transversal direta B-B' - 54 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	122
Figura 84 – Velocidade transversal direta B-B' - 30 kHz – Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	122
Figura 85 – Velocidade transversal direta C-C' - 200 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	123
Figura 86 – Velocidade transversal direta C-C' - 54 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	123
Figura 87 – Velocidade transversal direta C-C' - 30 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	123

Figura 88 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) B e B' - 200 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	124
Figura 89 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) B e B' - 54 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	124
Figura 90 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) C e C' - 200 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	125
Figura 91 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) C e C' - 54 kHz - Hymenolobium petraeum 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	125
Figura 92 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 200 kHz - Hymenolobium petraeum 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	126
Figura 93 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 54 kHz - Hymenolobium petraeum 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	126
Figura 94 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 200 kHz - Hymenolobium petraeum 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	127
Figura 95 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 54 kHz - Hymenolobium petraeum 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	127
Figura 96 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C' - 200 kHz - Hymenolobium petraeum 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	128
Figura 97 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C' - 54 kHz - Hymenolobium petraeum 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	128
Figura 98 – Velocidade transversal direta B-B' - 200 kHz - Hymenolobium petraeum 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	129
Figura 99 – Velocidade transversal direta B-B' - 54 kHz - Hymenolobium petraeum 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	129
Figura 100 – Velocidade transversal direta C-C' - 200 kHz - Hymenolobium petraeum 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	130
Figura 101 – Velocidade transversal direta C-C' - 54 kHz - Hymenolobium petraeum 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	130
Figura 102 – Análise das leituras adjacentes C-C' - 54 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 5 cm x 11 cm x 300 cm .....	131
Figura 103 – Análise das leituras adjacentes C-C' - 54 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	132
Figura 104 – Mapeamento visual - Análise adjacente - <i>Pinus elliottii</i> .....	133
Figura 105 – Análise das leituras de referência C-C' - 54 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 5 cm x 11 cm x 300 cm. ....	134
Figura 106 – Análise das leituras de referência C-C' - 54 kHz - <i>Pinus elliottii</i> 7 cm x 15 cm x 300 cm. ....	135
Figura 107 – Mapeamento visual - Análise de referência - <i>Pinus elliottii</i> .....	136





## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Profundidade (e) da fenda .....	66
Quadro 2 – Velocidades longitudinais diretas: <i>Pinus elliottii</i> .....	69
Quadro 3 – Velocidades longitudinais diretas: <i>Hymenolobium</i> <i>petraeum</i> .....	70
Quadro 4 – Resumo dos ensaios longitudinais B e B' (móvel): <i>Pinus</i> <i>elliottii</i> .....	74
Quadro 5 – Resumo dos ensaios longitudinais C e C' (móvel): <i>Pinus</i> <i>elliottii</i> .....	74
Quadro 6 – Resumo dos ensaios longitudinais B e B' (móvel): <i>Hymenolobium Petraeum</i> .....	76
Quadro 7 – Resumo dos ensaios longitudinais C e C' (móvel): <i>Hymenolobium Petraeum</i> .....	77
Quadro 8 – Resumo dos ensaios transversais: <i>Pinus elliottii</i> .....	80
Quadro 9 – Resumo dos ensaios transversais: <i>Hymenolobium</i> <i>Petraeum</i> .....	83
Quadro 10 – Velocidades: ensaio fenda transversal .....	85



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	29
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	29
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	29
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>31</b>
2.1 ANATOMIA DA MADEIRA .....	31
2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS MADEIRAS .....	32
2.3 CARACTERÍSTICAS DAS ESPÉCIES <i>Pinus elliottii</i> e <i>Hymenolobium petraeum</i> .....	34
2.4 PROPRIEDADES DA MADEIRA .....	35
2.5 MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS .....	37
2.6 TÉCNICA DO ULTRASSOM .....	40
2.7 FATORES QUE INFLUENCIAM A PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS NA MADEIRA .....	42
2.7.1 Propriedades anatômicas .....	43
2.7.2 Densidade da madeira .....	44
2.7.3 Teor de umidade da madeira .....	46
2.7.4 Temperatura da madeira .....	48
2.7.5 Configuração geométrica da amostra .....	49
2.7.6 Frequência do transdutor .....	51
2.7.7 Defeitos da madeira .....	53
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>57</b>
3.1 MATERIAIS .....	57
3.1.1 Madeira .....	57
3.1.2 Amostras e corpos de prova .....	58
3.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE .....	60
3.3 ENSAIOS DE ULTRASSOM .....	60

3.3.1 Ensaio A-A': longitudinal direto .....	62
3.3.2 Ensaio B e B' / C e C': longitudinal indireto fixo.....	63
3.3.3 Ensaio B e B' / C e C': longitudinal indireto móvel.....	64
3.3.4 Ensaio B-B' / C-C': transversal direto.....	64
3.3.5 Ensaio da influência de uma fenda artificial .....	65
<b>4 RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>69</b>
4.1 ENSAIO A-A': LONGITUDINAL DIRETO.....	69
4.1.1 <i>Pinus elliottii</i> : 5 cm x 11 cm x 300 cm / 7 cm x 15 cm x 300 cm.....	69
4.1.2 <i>Hymenolobium petraeum</i> : 5 cm x 11 cm x 300 cm / 7 cm x 15 cm x 300 cm.....	70
4.2 ENSAIO B e B' / C e C': LONGITUDINAL INDIRETO FIXO.....	71
4.2.1 <i>Pinus elliottii</i> : 5 cm x 11 cm x 300 cm / 7 cm x 15 cm x 300 cm.....	71
4.2.2 <i>Hymenolobium petraeum</i> : 5 cm x 11 cm x 300 cm / 7 cm x 15 cm x 300 cm.....	71
4.3 ENSAIO B e B' / C e C': LONGITUDINAL INDIRETO MÓVEL.....	72
4.3.1 <i>Pinus elliottii</i> : 5 cm x 11 cm x 300 cm / 7 cm x 15 cm x 300 cm.....	72
4.3.2 <i>Hymenolobium Petraeum</i> : 5 cm x 11 cm x 300 cm / 7 cm x 15 cm x 300 cm.....	75
4.4 ENSAIO B-B' / C-C': TRANSVERSAL DIRETO.....	77
4.4.1 <i>Pinus elliottii</i> : 5 cm x 11 cm x 300 cm / 7 cm x 15 cm x 300 cm.....	77
4.4.2 <i>Hymenolobium Petraeum</i> : 5 cm x 11 cm x 300 cm / 7 cm x 15 cm x 300 cm.....	81
4.5 ENSAIO DA INFLUÊNCIA DE UMA FENDA ARTIFICIAL .....	84
4.6 ANÁLISE DA DETECÇÃO DE DEFEITOS NATURAIS EM ELEMENTOS DE MADEIRA.....	86
4.6.1 Análise das leituras adjacentes .....	87
4.6.2 Análise das leituras de referência .....	92
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>99</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>101</b>
<b>APÊNDICE A – Medidas de ultrassom: <i>Pinus e. 5x11x300</i> .....</b>	<b>107</b>

<b>APÊNDICE A-1 – Velocidades longitudinais indiretas (móveis) .....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE A-2 – Velocidades transversais diretas.....</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE A-3 – Velocidades longitudinais indiretas (fixo) .....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE B – Medidas de ultrassom: <i>Pinus e. 7x15x300</i> .....</b>	<b>114</b>
<b>APÊNDICE B-1 – Velocidades longitudinais indiretas (móveis).....</b>	<b>114</b>
<b>APÊNDICE B-2 – Velocidades transversais diretas.....</b>	<b>117</b>
<b>APÊNDICE C – Medidas de ultrassom: <i>Hymenolobium p. 5x11x300</i> .....</b>	<b>119</b>
<b>APÊNDICE C-1 – Velocidades longitudinais indiretas (móveis) .....</b>	<b>119</b>
<b>APÊNDICE C-2 – Velocidades transversais diretas.....</b>	<b>122</b>
<b>APÊNDICE C-3 – Velocidades longitudinais indiretas (fixo) .....</b>	<b>124</b>
<b>APÊNDICE D – Medidas de ultrassom: <i>Hymenolobium p. 7x15x300</i> .....</b>	<b>126</b>
<b>APÊNDICE D-1 – Velocidades longitudinais indiretas (móveis) .....</b>	<b>126</b>
<b>APÊNDICE D-2 – Velocidades transversais diretas.....</b>	<b>129</b>
<b>APÊNDICE E – Localização de defeitos: <i>Pinus elliottii</i>.....</b>	<b>131</b>
<b>APÊNDICE E-1 – Análise das leituras adjacentes C-C’ .....</b>	<b>131</b>
<b>APÊNDICE E-2 – Análise das leituras de referência C-C’ .....</b>	<b>134</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais mais antigos e mais importantes utilizados nas construções e o seu uso apresenta diversas vantagens, tais como apresentar grande potencial de renovação na natureza, propriedades adequadas à pré-fabricação, elevada resistência mecânica em relação ao peso próprio e baixo consumo energético em seu processamento. Para se ter uma ideia, a produção de uma tonelada de concreto exige uma quantidade de energia quatro vezes maior do que a utilizada na produção de uma tonelada de madeira (TORRES, 2010).

Devido as suas propriedades mecânicas e a sua abundância na natureza, a madeira foi, durante séculos, o principal material utilizado na estrutura de edificações, em estruturas de telhado, na construção de embarcações, entre outros usos. Do ponto de vista estrutural, por possuir boa resistência à tração e à compressão, a madeira é um material naturalmente resistente à flexão, o que possibilita o seu uso nos mais diversos sistemas estruturais. O seu campo de aplicação era vastíssimo (BRANCO, 2003). Entretanto, devido ao seu mau uso, à má conservação de edificações construídas com esse material e ao surgimento do concreto armado, que ocorreu no século XX, a utilização da madeira como elemento estrutural entrou gradativamente em declínio, e a mesma começou a ser vista erroneamente como um material frágil e de pouca durabilidade.

Assim, como todos os materiais de construção, a madeira está sujeita à deterioração, o que pode ocasionar alguns problemas em edificações caso não sejam adotados os devidos cuidados no projeto, na execução, no uso e na manutenção dessas edificações. Lamentavelmente, o panorama atual de muitas edificações indica que raramente todos esses cuidados são adotados, o que faz com que seja frequente a ocorrência de fenômenos patológicos em estruturas de madeira. Também em virtude desse descaso, a vida útil de muitas construções em madeira é afetada, sendo geralmente menor do que a inicialmente prevista no projeto. A manutenção periódica e bem realizada em estruturas de madeira pode evitar gastos não previstos e consumo desnecessário de material.

Por conseguinte, inspeções periódicas são extremamente necessárias para se conhecer com profundidade o estado de conservação de uma edificação. Essas inspeções podem ser realizadas pela investigação da integridade de elementos estruturais, com o uso de materiais, equipamentos e técnicas adequadas, através de ensaios destrutivos e não destrutivos, tanto em laboratório como in-loco. Esses

ensaios procuram avaliar as características físicas e mecânicas dos materiais.

Os ensaios destrutivos são aqueles que envolvem uma prova mecânica destrutiva em um corpo de prova. Esse tipo de ensaio caracteriza-se pela retirada de um corpo de prova do elemento estrutural a ser testado e, em grande parte dos casos, não é possível aplicá-lo a uma estrutura em serviço sem causar danos a esta. Esses danos provocados pela extração de testemunhos normalmente precisam ser corrigidos, de modo a não comprometer o comportamento futuro da estrutura.

Assim sendo, uma opção mais viável para avaliar o estado de conservação de uma edificação, alternativa aos métodos destrutivos, é a execução de ensaios não destrutivos, através dos quais não se faz necessária a extração de corpos de prova, visto que a avaliação é realizada no próprio elemento componente da estrutura, sem que ocorra qualquer prejuízo ao seu uso. A avaliação não destrutiva é definida como sendo a ciência de identificar as propriedades físicas e mecânicas de uma peça de determinado material sem alterar suas capacidades de uso final (ROSS; PELLERIN, 1994).

Dentre os métodos não destrutivos existentes, destaca-se a técnica de ultrassom, que é utilizada com frequência em função de sua praticidade. Por meio desse método, calcula-se a velocidade de propagação de uma onda em um substrato a partir da medição do tempo de propagação do pulso e da distância entre os transdutores. Para a correta utilização dessa técnica, seja para avaliar a integridade de um elemento estrutural ou estimar sua resistência mecânica através de correlações, é indispensável a compreensão do fenômeno de propagação da onda ultrassônica no material, através do estabelecimento de relações entre os fatores envolvidos.

Por ser um material ortotrópico e heterogêneo (nas diferentes direções), a velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira é influenciada pelos mais variados fatores, o que exige maior atenção na aplicação dessa técnica. Entre esses fatores, podemos citar as propriedades anatômicas de cada espécie, a direção de propagação da onda (longitudinal, radial ou tangencial), o teor de umidade, a densidade e a temperatura da madeira, as características dos transdutores, a presença de defeitos (nós e rachaduras), as características geométricas dos elementos, as condições do meio (temperatura e umidade relativa), entre outros. É evidente que para um material homogêneo e isotrópico, a velocidade de propagação da onda tende a ser mais facilmente compreendida, face à sua estrutura interna praticamente contínua.



## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho consiste em avaliar a influência de determinados fatores na propagação de uma onda ultrassônica na madeira, bem como avaliar a sensibilidade da técnica de ultrassom na identificação de defeitos nos elementos de madeira, contribuindo para o aperfeiçoamento do uso de técnicas de ensaios não destrutivos no diagnóstico da deterioração e caracterização de peças de madeira.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- a) aperfeiçoar o uso da técnica de ultrassom na inspeção e caracterização mecânica de estruturas de madeira;
- b) avaliar a influência da espécie da madeira, das dimensões da peça avaliada, da presença de nós e desvio de grã e do transdutor na velocidade ultrassônica longitudinal, radial e tangencial;
- c) avaliar a influência de defeitos, com diferentes dimensões, no interior de peças de madeira, nos resultados obtidos pela utilização da técnica do ultrassom.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho é constituído por sete capítulos: Introdução, Revisão bibliográfica, Materiais e métodos, Resultados e discussões, Conclusões, Referências e Apêndices. No primeiro capítulo, o tema do trabalho é apresentado de maneira sucinta e também são descritos os objetivos do trabalho.

Na Revisão bibliográfica, são abordados aspectos gerais relativos às características da madeira. São descritos também os princípios básicos da propagação de ondas ultrassônicas em um meio sólido, assim como os diversos fatores que influenciam a propagação dessas ondas na madeira.

No capítulo três, Materiais e métodos, são apresentados os materiais utilizados para a execução dos ensaios propostos e as metodologias utilizadas nos ensaios não destrutivos de ultrassom.

O capítulo quatro, Resultados e análises, apresenta gráficos, tabelas e análises dos resultados obtidos com os ensaios de umidade e ultrassom. Nos três últimos capítulos encontram-se, respectivamente, as Conclusões obtidas nesse trabalho, as Referências e os Apêndices.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Brasil é um país com aproximadamente 463,2 milhões de hectares (54,4% do seu território) cobertos por florestas nativas e plantadas, o que representa a segunda maior área florestal do mundo, ficando atrás apenas da Rússia, sendo que, desse total, 456,1 milhões de hectares são florestas nativas e 7,1 milhões de hectares são florestas plantadas (SNIF, 2012). Além disso, é reconhecido internacionalmente pela riqueza da biodiversidade de suas florestas. Embora seja um material encontrado com abundância nesse país, a madeira é atualmente um material de construção pouco valorizado, principalmente como elemento estrutural. Sendo assim, essa vocação florestal necessita ser mais bem aproveitada.

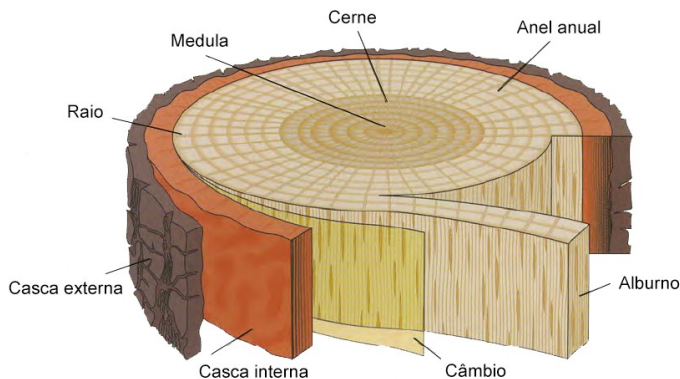
O conhecimento das características físicas e das propriedades mecânicas da madeira contribui para a diversificação do uso das espécies disponíveis e possibilita o emprego das espécies mais adequadas a cada finalidade (MADY, 2000). Assim, para se ter uma compreensão abrangente e consistente do comportamento da madeira é necessária que seja realizada uma abordagem interdisciplinar.

### 2.1 ANATOMIA DA MADEIRA

A anatomia da madeira é o ramo da ciência botânica que procura conhecer o arranjo estrutural dos diversos elementos que constituem o lenho e a sua organização (IPT, 1986). O lenho, por sua vez, é constituído por diversos tipos de células elementares, cujas dimensões, formas e agrupamentos variam com a sua localização no tronco e a espécie de madeira. Essas células, dispostas nos sentidos radial e longitudinal são ligadas entre si pela lignina.

Apresenta-se na Figura 1, a seção transversal de um tronco. Do centro para a periferia podem ser observadas as seguintes regiões: medula, cerne, albarno e casca. O câmbio, presente entre a casca e o albarno, é visível somente ao microscópio. Nas gimnospermas, principalmente, nota-se no lenho regiões escuras (formadas nas estações outono/inverno - lenho tardio) intercaladas por regiões claras (formadas nas estações primavera/verão - lenho inicial), cujo conjunto denomina-se anel de crescimento (anel anual).

Figura 1 – Seção transversal de um tronco.



Fonte: Adaptado de ARNO *et al.* (1993).

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS MADEIRAS

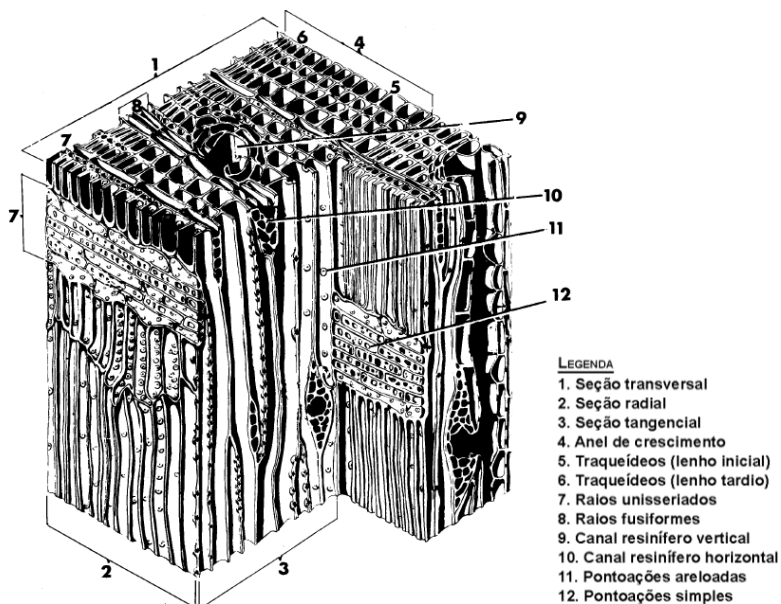
As madeiras podem ser classificadas taxonomicamente em duas categorias: gimnospermas e angiospermas (IPT, 1986). As madeiras comerciais utilizadas em construção também podem ser distinguidas em dois grupos principais (PFEIL; PFEIL 2003):

- ♦ resinosas: proveniente em geral das coníferas (da classe gimnosperma), usualmente de crescimento mais rápido que as angiospermas dicotiledôneas. Também são conhecidas como *Softwoods*;

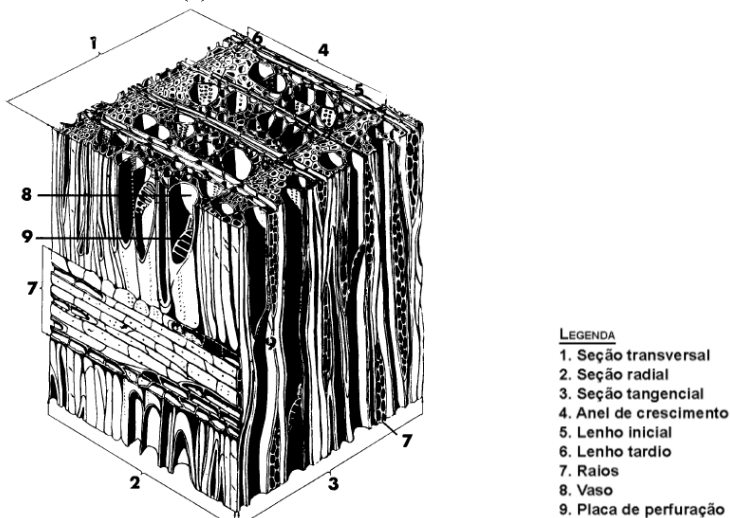
- ♦ folhosas: proveniente de árvores frondosas (dicotiledôneas, da classe angiosperma), geralmente de crescimento mais lento que as gimnospermas. Também são conhecidas por *Hardwoods*;

Esta denominação (*Softwoods/Hardwoods*) é, no entanto, um pouco enganosa, porque algumas espécies classificadas como *Softwoods* são um pouco mais duras do que muitas espécies classificadas como *Hardwoods*. A distinção entre estes dois grupos baseada em características anatômicas é muito mais precisa (BODIG; JAYNE, 1993; STALNAKER; HARRIS, 1997). Para enfatizar, Stalnaker e Harris (1997), citam a espécie Balsa (*Ochroma pyramidale*) que, apesar de ser uma madeira muito macia, é classificada como *Hardwood*. O arranjo das células nas resinosas e nas folhosas é apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Estrutura celular de resinosas (a) e folhosas (b).



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de FOULGER (1969).

Nota-se que as resinosas são compostas principalmente por células denominadas traqueídeos, estreitas e com extremidades fechadas, orientadas longitudinalmente no sentido do eixo da árvore. Apesar de algumas similaridades, as folhosas apresentam maior variedade de células e, portanto, possuem uma estrutura mais complexa que as resinosas. Como elementos constituintes principais das folhosas encontram-se as fibras e os vasos (BODIG; JAYNE, 1993; FOULGER, 1969).

### 2.3 CARACTERÍSTICAS DAS ESPÉCIES *Pinus elliottii* e *Hymenolobium petraeum*

De acordo com Pait III *et al.* (1991), o *Pinus elliottii*, originário dos EUA, tem como região de ocorrência natural a área que se estende do Estado da Carolina do Sul até o leste do Estado da Louisiana, em uma faixa estreita ao longo de planícies adjacentes ao Golfo do México e à Costa Atlântica. Em condições naturais, pode atingir alturas entre 20 m e 40 m e DAP (diâmetro a altura do peito) entre 60 cm e 90 cm, com suas raízes atingindo até 5 m de profundidade (LAMPRECHT, 1990, *apud* COELHO; FINGER, 1997).

A espécie, que foi introduzida no Brasil, se caracteriza pela facilidade nos tratos culturais, rápido crescimento e reprodução intensa no Sul e Sudeste do nosso país (BRACELPA, 2014). Quanto à durabilidade natural, o IPT (2009) considera esta madeira como suscetível ao ataque de fungos, cupins, brocas de madeira e perfuradores marinhos. No entanto, é fácil de ser tratada. A madeira de *Pinus elliottii* possui massa específica aparente de 480 kg/m<sup>3</sup> a 15% de umidade, considerada baixa.

O Angelim pedra, nativo, nesse trabalho identificado macroscopicamente como *Hymenolobium petraeum*, tem como região de ocorrência no Brasil os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará e Rondônia. Apresenta cerne castanho-avermelhado e alburno com coloração castanho-pálido. No geral, a madeira de *Hymenolobium petraeum* é considerada durável, sendo o seu cerne difícil de preservar, ao contrário do seu alburno. Apresenta massa específica aparente de 710 kg/m<sup>3</sup> a 12% de umidade, considerada média. Destaca-se por possuir elevada resistência mecânica (IPT, 2009).

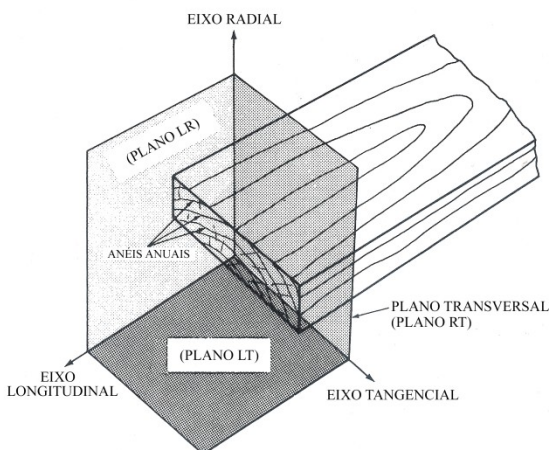
## 2.4 PROPRIEDADES DA MADEIRA

A madeira é um material heterogêneo natural e complexo, estrutural e morfologicamente. Logo, o conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas é indispensável para a sua utilização correta e racional como material de construção, em especial como elemento componente da estrutura.

Devido a sua estrutura interna (orientação das células), a madeira é um material ortotrópico, apresentando três direções principais perpendiculares entre si: longitudinal, radial e tangencial. Isso significa que as suas propriedades físicas e mecânicas diferem nessas direções (STALNAKER; HARRIS, 1997). A Figura 3 apresenta os eixos nessas direções, bem como os três planos de referência (planos ou seções fundamentais de observação) associados a esses eixos:

- a) plano RT (radial-tangencial): transversal ou de topo, perpendicular aos elementos axiais;
- b) plano LR (longitudinal-radial): plano no sentido axial, perpendicular aos anéis anuais;
- c) plano LT (longitudinal-tangencial): plano no sentido axial, tangente aos anéis anuais.

Figura 3 – Eixos ortotrópicos e planos de referência da madeira.



Fonte: Adaptado de STALNAKER; HARRIS (1997).

Como consequência da sua origem biológica, a madeira apresenta, de modo geral, propriedades físicas e mecânicas com elevado grau de variabilidade (a NBR 7190:1997 admite, a favor da segurança, 18% de coeficiente de variação nas propriedades de resistência mecânica quando não se conhecem valores experimentais efetivos), tipicamente superior a outros materiais comumente utilizados nas construções. Pelo mesmo motivo, também pode apresentar defeitos, como nós e fendas, que interferem diretamente em suas propriedades mecânicas.

De acordo com Malan (1995), as variações dessas propriedades ocorrem entre as espécies, dentro de cada espécie, bem como dentro de um mesmo tronco. As variações no sentido radial são a fonte de variação mais importante, sendo influenciadas pela proporção de madeira juvenil e suas propriedades físicas e mecânicas ao longo do tronco.

A massa específica e o teor de umidade são as duas das características mais importantes inerentes à madeira (BODIG; JAYNE, 1993). A variação natural de peso em madeiras de iguais dimensões reflete a quantidade de matéria lenhosa por unidade de volume ou a quantidade de ocos nelas existentes (BURGER; RICHTER, 1991). Logo, a massa específica está relacionada diretamente com propriedades físicas e mecânicas da madeira.

Quanto à água, a madeira é um material higroscópico e a umidade está presente nela de duas diferentes formas: como água de impregnação, que corresponde à água localizada nas paredes das células, e como água livre, relativa à água presente nas cavidades das células (lúmens). Com base nisso, define-se o ponto de saturação das fibras, cujo teor de umidade correspondente varia de espécie para espécie, como sendo o teor de umidade no qual as paredes celulares estão completamente saturadas enquanto que os lúmens estão essencialmente vazios (STALNAKER; HARRIS, 1997). A água de impregnação é particularmente importante, uma vez que variações no seu teor acarretam em modificação das propriedades mecânicas da madeira, enquanto que variações no teor de água livre, exceto se congelada, não tem efeito significativo sobre as propriedades físicas e mecânicas, a não ser na variação da massa do elemento de madeira. (BODIG; JAYNE, 1993).

Um elemento de madeira, assim que retirado da árvore, contém uma quantidade apreciável de água. Após essa retirada, ocorre o processo de secagem da madeira, no qual primeiramente ocorre a saída da água livre. Nessa fase praticamente não ocorre variação dimensional



no elemento. Em seguida, depois de atingido o ponto de saturação das fibras, quando a secagem continua, ocorre a saída da água de impregnação. Entretanto, nessa última etapa, a saída de água vem acompanhada de variações dimensionais e de propriedades mecânicas. A alteração dimensional (retração, no caso) na direção longitudinal é, proporcionalmente as outras direções, muito pequena e praticamente desprezível. Já a alteração na direção tangencial tem o valor mais alto, enquanto que a alteração na direção radial é, em geral, duas vezes menor do que a tangencial (BROWN *et al.*, 1949).

## 2.5 MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS

A decisão de recuperar estruturalmente construções existentes, como alternativa à substituição por estruturas totalmente novas, é frequentemente tomada por motivos econômicos e de sustentabilidade das edificações. Em determinadas circunstâncias, no entanto, é a necessidade de preservação do patrimônio histórico ou cultural que impõe a recuperação da edificação degradada, situação que geralmente determina o tipo de intervenção a ser realizada (FEIO; LOURENÇO, 2005).

Para minimizar as ações de recuperação, é indispensável que se realize uma investigação da integridade dos elementos que compõem essas estruturas, por meio de inspeções e avaliações periódicas. Tais ações possuem grande importância no processo de reabilitação e conservação da estrutura e podem ser realizadas por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos. No caso de edificações existentes, em particular de acervo construído histórico, a conveniência do uso de métodos não destrutivos é evidente. No presente trabalho, o assunto abordado serão os métodos não destrutivos, com ênfase na técnica do ultrassom e nos fatores que influenciam a propagação de ondas ultrassônicas na madeira.

Historicamente, a hipótese fundamental do uso de métodos não destrutivos para a madeira foi lançada por Jayne (1959). Ele constatou que as propriedades de armazenamento e dissipação de energia da madeira, que podem ser medidas de maneira não destrutiva, são controladas pelos mesmos mecanismos que regem o comportamento estático desse material. Como consequência, relações matemáticas entre essas propriedades e o comportamento estático da madeira podem ser alcançadas por meio de análises estatísticas (ROSS; PELLERIN, 1994).

Os ensaios não destrutivos não prejudicam a utilização futura de uma edificação, muito menos a comprometem estruturalmente. Em

outras palavras, a avaliação não destrutiva não deixa vestígios de sua aplicação nos elementos ensaiados. Adicionalmente, permite a inspeção de uma peça tanto antes, como durante o seu uso, ao longo de sua vida útil, podendo ser um forte indicativo da necessidade de substituição da peça danificada ou da sua recuperação apenas.

De acordo com Demaus (1996), se houver suspeitas de problemas de deterioração ou de problemas estruturais, escondidos por revestimentos ou ocultos dentro de elementos estruturais, o uso de técnicas convencionais de investigação (principalmente das que envolvem extração de corpos de prova) pode resultar em danos extensos e desnecessários.

Os métodos não destrutivos utilizados na indústria de produtos florestais podem ser classificados nos seguintes grupos (ZOMBORI, 2001):

- a) detecção de defeitos em madeira maciça: detecção de nós, desvio de grã, defeitos provocados por ataque de insetos, etc., com o intuito de incrementar a produção de peças de madeira;
- b) classificação e seleção de produtos estruturais: permitem classificar elementos de madeira de modo mais confiável do que com a simples classificação visual;
- c) avaliação *in loco* de elementos de madeira em estruturas: servem para minimizar os erros provenientes de inspeções visuais e para monitorar a condição da estrutura durante a sua vida útil;
- d) monitoramento de árvores vivas: auxilia o corte da madeira, bem como pode proporcionar aumento de produtividade.

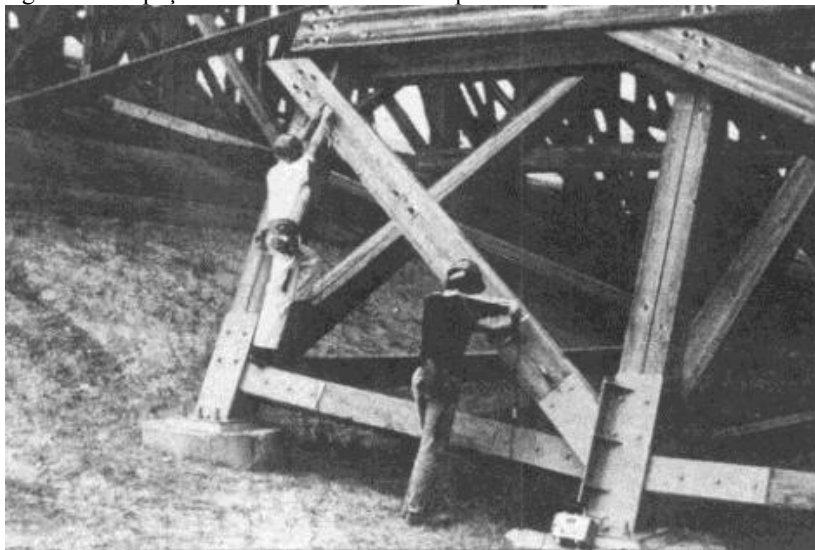
Referindo-se à madeira, ao longo da história as técnicas não destrutivas foram desenvolvidas e utilizadas quase que exclusivamente para classificar ou selecionar elementos estruturais. Entretanto, à medida que mais recursos são dedicados à recuperação de edificações existentes, a utilização dessas técnicas para avaliar estruturas de madeira torna-se necessária, desde que sejam precisas e que apresentem relação custo benefício satisfatória (ROSS; PELLERIN, 1994).

O uso de métodos não destrutivos não se restringe apenas a edificações comuns. Esses métodos podem ser utilizados para avaliar

obras de arte especiais, como pontes, por exemplo. Emerson *et al.* (1998) afirmam que para se obter uma ampla avaliação do estado de integridade de pontes de madeira é necessária que se faça uma avaliação não destrutiva dos elementos que compõem a sua estrutura. Os autores também descrevem que uma variedade de técnicas tem sido empregada na inspeção de pontes de madeira, apresentando suas vantagens e desvantagens. As técnicas por eles abordadas foram: inspeção visual, ondas de tensão, resistência à penetração, radiografia, micro-ondas, vibração e ultrassom.

De maneira mais abrangente, Zombori (2001) realiza um estudo dos principais métodos de avaliação não destrutiva (ferramentas de inspeção) de edificações de madeira: Método das ondas de tensão (Figura 4); Técnica do Ultrassom; Resistência à penetração; Retirada de parafuso; Método de esclerometria do Pylodin; Método dos raios X; Radiação gama e, até mesmo, o uso de cães farejadores (para a identificação de fungos em estruturas de madeira). Dentre esses métodos, a técnica do ultrassom merece destaque, uma vez que muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com esta técnica.

Figura 4 – Inspeção de elemento de madeira pelo método das ondas de tensão.



Fonte: ZOMBORI (2001).

## 2.6 TÉCNICA DO ULTRASSOM

As ondas são um tipo de perturbação transmitida através do vácuo ou de um meio material. De acordo com Halliday *et al.* (2009), as ondas podem ser de três tipos principais: mecânicas, eletromagnéticas e de matéria. As ondas sonoras são ondas mecânicas e assim sendo são governadas pelas leis de Newton e necessitam de um meio material para se propagarem.

Para uma onda periódica, a velocidade da onda ( $V$ ) é igual ao produto do comprimento de onda ( $\lambda$ ) pela frequência ( $f$ ), como pode ser visto na Equação 2.1 (SEARS *et al.*, 2008):

$$V = \lambda \cdot f \quad (2.1)$$

A técnica do ultrassom envolve a análise das características de ondas sonoras de alta frequência ( $f > 20$  kHz) ao propagarem-se através de determinado meio material (EMERSON *et al.*, 1998). Especificamente, no caso da madeira, o intervalo de frequência utilizado é relativamente pequeno (entre 20 kHz e 500 kHz), pois nesse material há elevada dissipação do sinal (ZOMBORI, 2001). Essa perda de intensidade do sinal atua como um dos limitadores na utilização desse método em estruturas de madeira, principalmente as de elementos de maior dimensão.

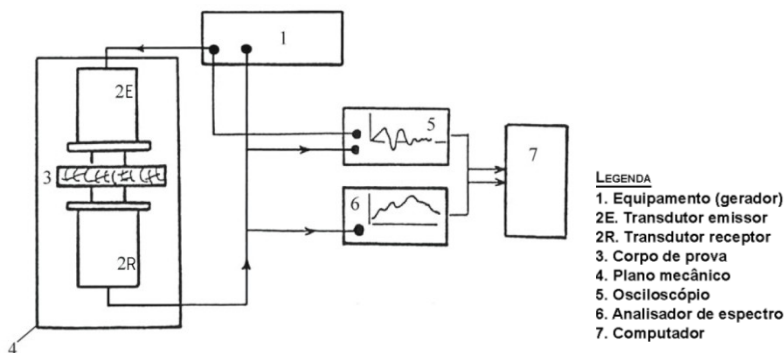
A determinação da velocidade ( $V$ ) de propagação do pulso ultrassônico em um meio é obtida a partir do tempo ( $t$ ) necessário para a sua propagação entre dois pontos distintos do elemento e da distância ( $d$ ) entre esses pontos (Equação 2.2). O tempo é indicado pelo equipamento de ultrassom e a distância entre os pontos corresponde à distância conhecida entre os transdutores. Para esse cálculo, admite-se que o percurso da onda é retilíneo.

$$V = \frac{d}{t} \quad (2.2)$$

O esquema mais usual para a medição da velocidade ultrassônica em um material está representado na Figura 5. O sinal elétrico é transmitido por um gerador para o transdutor emissor (2E) e assim transformado em um pulso ultrassônico. Esse pulso atravessa o corpo de prova até o transdutor receptor (2R) e é transformado em um sinal elétrico que pode ser visualizado em um osciloscópio. Isso possibilita a medição do tempo decorrido entre a emissão e a recepção do sinal. Os

transdutores considerados são do tipo piezoelétrico, que convertem sinais elétricos em vibrações mecânicas na emissão e vibrações mecânicas em sinais elétricos na recepção (BUCUR, 2006). Isto é, tem-se a propagação de uma onda mecânica no meio material em questão. A técnica é muito simples e as medições do tempo podem ser muito precisas. Para a obtenção de medidas mais sofisticadas, relacionadas à atenuação, por exemplo, pode ser utilizado um analisador de espectro.

Figura 5 – Diagrama de um sistema de medidas com ultrassom.

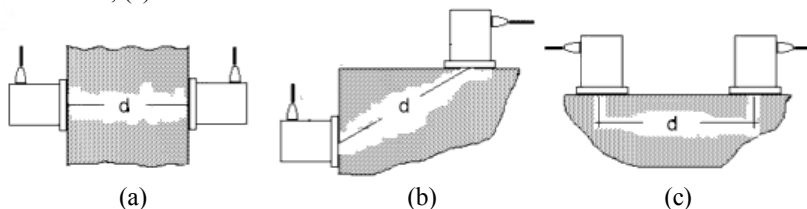


Fonte: Adaptado de BUCUR; BÖHNKE (1994) *apud* BUCUR (2006).

O ultrassom é um teste verdadeiramente não destrutivo, pois como visto, a sua técnica envolve a propagação de ondas ultrassônicas que não provocam dano ao elemento que é testado (FERRARI; PADARATZ, 2003). De acordo com Bucur (2006), a obtenção da velocidade ultrassônica na madeira é a base da avaliação não destrutiva de suas propriedades elásticas. Para a execução desse teste, é geralmente desejável que o tamanho da amostra (da face em contato com o transdutor) seja significativamente maior do que o diâmetro do transdutor, com o intuito de reduzir os efeitos de borda (BUCUR, 2006).

Quanto ao posicionamento dos transdutores, há basicamente três configurações básicas como os mesmos podem ser dispostos durante a realização dos ensaios: direta, semidireta e indireta. Na transmissão direta os transdutores são posicionados em faces opostas, na semidireta em faces adjacentes e na indireta na mesma face (Figura 6).

Figura 6 – Esquemas típicos de leituras com ultrassom: (a) direta; (b) semidireta; (c) indireta.



Fonte: Adaptado de NESVIJSKI (2000).

## 2.7 FATORES QUE INFLUENCIAM A PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS NA MADEIRA

Diferentemente de outros sólidos, a propagação de ondas ultrassônicas em madeiras constitui um fenômeno de considerável complexidade. As constantes de propagação, isto é, a velocidade e os coeficientes de absorção, são significativamente afetados não somente pela heterogeneidade da composição química, pela sua microestrutura, pela irregularidade na disposição dos elementos anatômicos, inerentes à estrutura biológica da madeira, como também pela sua natureza higroscópica (CARRASCO; AZEVEDO JÚNIOR, 2003).

De acordo com Bucur (2006), as propriedades físicas da parede celular (como a densidade), o módulo de rigidez, a forma e o tamanho das fibras entre outros elementos afetam a transmissão do campo ultrassônico. Adicionalmente, interpretações errôneas das velocidades obtidas podem comprometer os resultados dos ensaios.

Emerson *et al.* (1998) destacam as principais dificuldades associadas à inspeção de estruturas de madeira com o uso do ultrassom: acoplagem efetiva entre os transdutores e a superfície da madeira, limitação nas dimensões do material para uma inspeção efetiva devida à atenuação natural da madeira (perda de transmissão) e o acesso às faces opostas do elemento de madeira para a transmissão e recepção do pulso.

A atenuação supracitada é a diminuição gradual da intensidade de energia de um sinal, com a distância, ao propagar-se através de um meio. De acordo com o *NDT Resource Center*, geralmente a atenuação é proporcional ao quadrado da frequência do som.

Assim, as ondas de alta frequência são afetadas significativamente pela atenuação em distâncias relativamente curtas na madeira, particularmente as ondas que se propagam perpendicularmente às fibras. Logo, a detecção de deteriorações e outros defeitos é

fundamentalmente efetiva em pequenas regiões de elementos de madeira (EMERSON *et al.*, 1998).

Em função dessa complexidade, comumente identificada em diversos trabalhos e artigos sobre o tema, nesta seção será realizada uma breve abordagem dos principais fatores que influem a propagação de pulsos ultrassônicos na madeira.

### **2.7.1 Propriedades anatômicas**

A madeira é um material anisotrópico e por isso possui diferentes características de acordo com a direção considerada. Assim sendo, o seu comportamento mecânico, bem como a propagação de ondas na madeira, estão diretamente relacionados à sua estrutura celular. O conhecimento do arranjo estrutural dos componentes do lenho assume relevante importância para o melhor entendimento dos mecanismos que regem a propagação de ondas ultrassônicas na madeira, um fenômeno relativamente complexo e que envolve uma gama de variáveis, sendo algumas delas interdependentes.

De acordo com Bucur (2006), uma estimativa precisa do comportamento mecânico da madeira requer uma análise simultânea da sua estrutura e do fenômeno de propagação de ondas. A propagação de ondas na madeira é claramente afetada pela sua estrutura, a qual atua como um filtro. Essa interação revela a anisotropia desse material.

Bucur (2006) também explica o fenômeno de propagação de ondas em madeira, baseando-se num modelo bastante simplificado da estrutura celular da madeira. Nesse modelo, os traqueídeos são considerados tubos constituídos por uma substância cristalina celulósica (celulose), incrustados em uma matriz amorfa (lignina). Assim, do ponto de vista acústico, a madeira pode ser considerada como um sistema retangular de tubos embutidos em uma matriz. A orientação longitudinal desses tubos (traqueídeos ou fibras) é parcialmente perturbada por tubos horizontais, os raios medulares, os quais se dispõem na direção radial. É interessante comentar que no sentido longitudinal, a dissipação de energia acústica se dá no limite dos tubos longitudinais. Na direção radial, as ondas novamente encontram uma estrutura tubular, devido à presença dos raios, porém na direção tangencial não há esse tipo de estrutura.

Assim, como a madeira possui módulos de elasticidade diferentes para cada direção em relação à orientação das fibras, a velocidade de propagação do ultrassom também se altera conforme a direção de propagação. Na direção longitudinal às fibras, constata-se as maiores

velocidades de propagação, pois nela as ondas encontram a estrutura contínua do material. A segunda maior velocidade é na direção radial, pois nela há a estrutura contínua dos raios. A menor velocidade de propagação é sempre a tangencial, onde as ondas viajam através de diferentes fases (TELES, 2002).

As características da madeira formada próxima à medula (madeira juvenil) diferem das características daquela formada próxima à casca (madeira adulta). Esse fenômeno é mais percebido nas coníferas que nas folhosas, principalmente nas regiões tropicais e subtropicais, devido ao crescimento muito rápido das árvores, atingindo tamanhos comerciais muito jovens (BALLARIN; NOGUEIRA, 2005). Os mesmos autores realizaram testes de ultrassom em corpos de prova de madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda*, e verificaram, para leituras longitudinais diretas, que o valor médio da velocidade nos corpos de prova de madeira adulta foi superior aos de madeira juvenil em 12,3%.

### **2.7.2 Densidade da madeira**

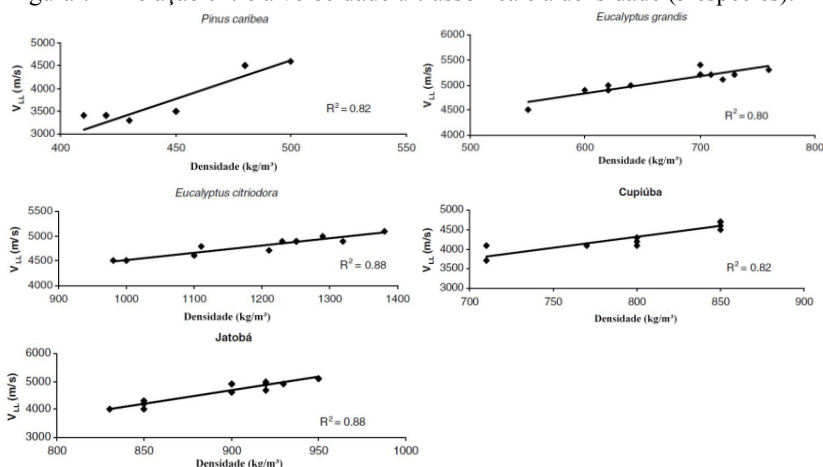
De acordo com Bartholomeu (2001), o fenômeno de transferência de energia por meio de uma onda ultrassônica na madeira está mais associado à sua estrutura celular do que à sua densidade aparente.

Para Karsulovic *et al.* (2000), *apud* Oliveira e Sales (2006), a densidade é um dos parâmetros mais amplamente utilizados para avaliar as propriedades mecânicas da madeira e é um importante fator que afeta a velocidade de uma onda ultrassônica.

Oliveira e Sales (2006) avaliaram o efeito da densidade na velocidade ultrassônica longitudinal para cinco espécies de madeira, utilizando corpos de prova com dimensões de 5 cm x 5 cm x 15 cm. A relação entre densidade e velocidade foi avaliada de duas maneiras distintas: separadamente para cada espécie e em conjunto. Os resultados obtidos para cada espécie separadamente indicam que a velocidade do pulso ultrassônico tende a aumentar com o aumento da densidade da madeira, com coeficientes de correlação variando entre 0,80 e 0,88 (Figura 7).



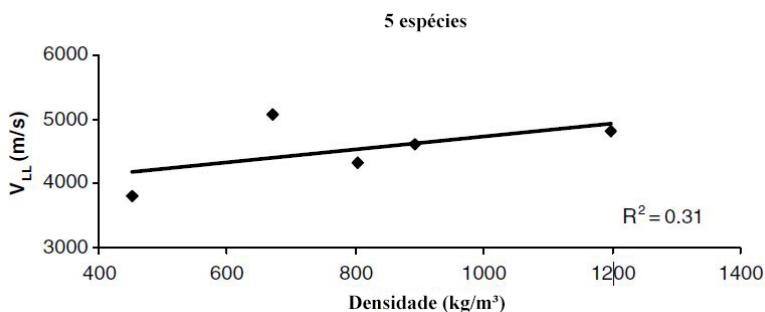
Figura 7 – Relação entre a velocidade ultrassônica e a densidade (5 espécies).



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA E SALES (2006).

Quando todas as espécies foram consideradas em conjunto (Figura 8), os resultados também indicam que a velocidade aumenta com a densidade, entretanto essa tendência não foi tão significativa (coeficiente de correlação = 0,31) como foi para cada espécie separadamente. A densidade mais alta foi obtida para a espécie *Eucalyptus citriodora* enquanto que a velocidade ultrassônica mais alta foi obtida para a espécie *Eucalyptus grandis*. As análises foram efetuadas para um nível de significância de 5%.

Figura 8 – Relação entre a velocidade ultrassônica e a densidade (geral).



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA E SALES (2006).

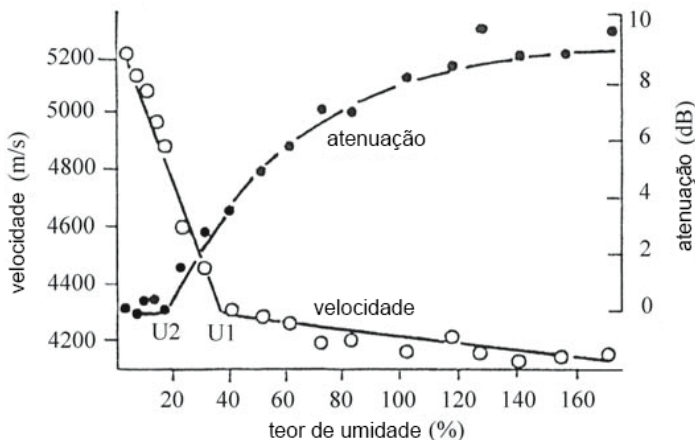
Para Carrasco e Azevedo Júnior (2003), não é propriamente o aumento da densidade que provoca o aumento na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas na madeira. Ao contrário, o aumento da densidade deveria provocar a redução da velocidade de propagação, visto que a velocidade é, conforme demonstrado em seu trabalho, inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade. Entretanto, considerando-se um valor constante de umidade ao longo da amostra, o aumento de densidade decorre da maior deposição de celulose na face interna da parede celular. Essa deposição acarreta um aumento muito mais significativo nos valores de rigidez do que nos valores de densidade da madeira. Assim, mesmo que haja um aumento da densidade, a velocidade não diminui, pois é compensada pelo notável aumento da rigidez. Contudo, o efeito da umidade na rigidez é, também, muito mais expressivo do que na densidade. Portanto, geralmente, as maiores velocidades ultrassônicas são atingidas em espécimes de madeiras com maiores densidades e menores teores de umidade.

### **2.7.3 Teor de umidade da madeira**

A madeira é um material higroscópico, ou seja, interage com o meio trocando umidade com ele. Essa característica da madeira interfere nas suas características físicas e mecânicas e, também, na propagação de ondas ultrassônicas.

De acordo com Bucur (2006), na descrição de uma pesquisa realizada por Sakai *et al.* (1990), com o aumento do teor de umidade, a velocidade ultrassônica na madeira diminui enquanto que a atenuação aumenta (Figura 9). A máxima velocidade e o mínimo valor de atenuação são obtidos quando a madeira se encontra seca. Na mesma figura, o ponto crítico U1 corresponde ao ponto de saturação das fibras e o ponto crítico U2 corresponde ao valor de umidade a partir do qual os elementos anatômicos da madeira começam a reter água livre.

Figura 9 – Efeito da umidade na atenuação e na velocidade ultrassônica.



Fonte: Adaptado de SAKAI *et al.* (1990), *apud* BUCUR (2006).

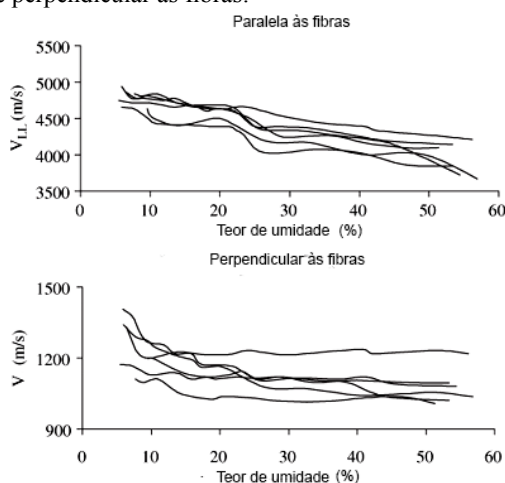
Também de acordo com o mesmo autor, para baixos teores de umidade ( $U < U_2$ ), quando a água se encontra ligada às moléculas de celulose da parede celular, o pulso ultrassônico é disperso pelas células da madeira e por células no seu entorno. Provavelmente, nesse caso, o mecanismo de atenuação relacionado com as características das paredes celulares é o fator mais importante. Já para valores de umidade compreendidos entre  $U_1$  e  $U_2$ , a dispersão nos contornos das células é provavelmente o mais importante mecanismo de atenuação. Para umidades maiores que  $U_1$ , em que há água presente nas cavidades celulares (lúmens das células), denominada água livre, a porosidade da madeira atua como fator predominante na dispersão do pulso ultrassônico.

Em seus estudos, Bartholomeu (2001) demonstrou que o teor de umidade apresenta influência considerável na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em peças de madeira, indicando a necessidade de que sejam obtidos modelos de variação para as espécies crescidas no Brasil.

Calegari *et al.* (2008) observaram que a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, obtidas com transdutores de pontos secos, apresentou influência significativa com o teor de umidade da madeira durante sua secagem, sendo essa relação inversamente proporcional e válida à madeira verde (saturada) até o final do processo de secagem.

Os resultados dos estudos de Oliveira *et al.* (2005) demonstraram que a velocidade ultrassônica é sensível à mudanças no teor de umidade da madeira para a espécie *Goupia glabra*. As velocidades ultrassônicas, tanto paralelas quanto perpendiculares às fibras, diminuíram à medida que o teor de umidade aumentou (Figura 10). Nota-se, a partir de seus resultados, que a velocidade ultrassônica na direção longitudinal mostrou-se mais sensível a variação do teor de umidade, apresentando melhor correlação.

Figura 10 – Relação entre o teor de umidade e a velocidade ultrassônica paralela e perpendicular às fibras.



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA *et al.* (2005).

## 2.7.4 Temperatura da madeira

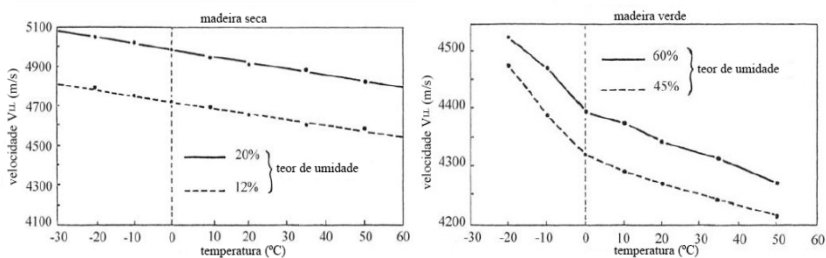
A influência simultânea da temperatura e do teor de umidade da madeira na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e em parâmetros elásticos é importante para a avaliação de elementos estruturais de madeira (SANDOZ, 1993; GREEN *et al.*, 1999, *apud* BUCUR, 2006).

Launay e Gilleta (1988), *apud* Bucur (2006), estudaram a influência concomitante da temperatura (20 °C – 80 °C) e do teor de umidade da madeira (6%, 12% e 18%) na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Constatou-se que, para esses baixos teores de umidade, a alteração do tempo de propagação do pulso devida à

temperatura é menos significativa do que devida à variação do teor de umidade.

Augé (1990), *apud* Bucur (2006), verificou na espécie *Pinus spruce*, para madeira seca ao ar e para o intervalo de temperatura compreendido entre -30 °C e 50 °C, que a velocidade de propagação da onda ultrassônica longitudinal geralmente aumenta linearmente com a diminuição da temperatura. Também observou comportamento similar para a madeira verde, porém com um aumento abrupto da taxa de variação da velocidade em relação à temperatura ( $\Delta V/\Delta T$ ), que ocorreu a temperatura de 0 °C (Figura 11). A partir desse maior aumento nas velocidades para temperaturas inferiores a 0 °C, a propagação da onda ultrassônica ocorre de maneira similar a propagação de ondas em meios porosos congelados.

Figura 11 – Influência da temperatura na velocidade paralela às fibras.

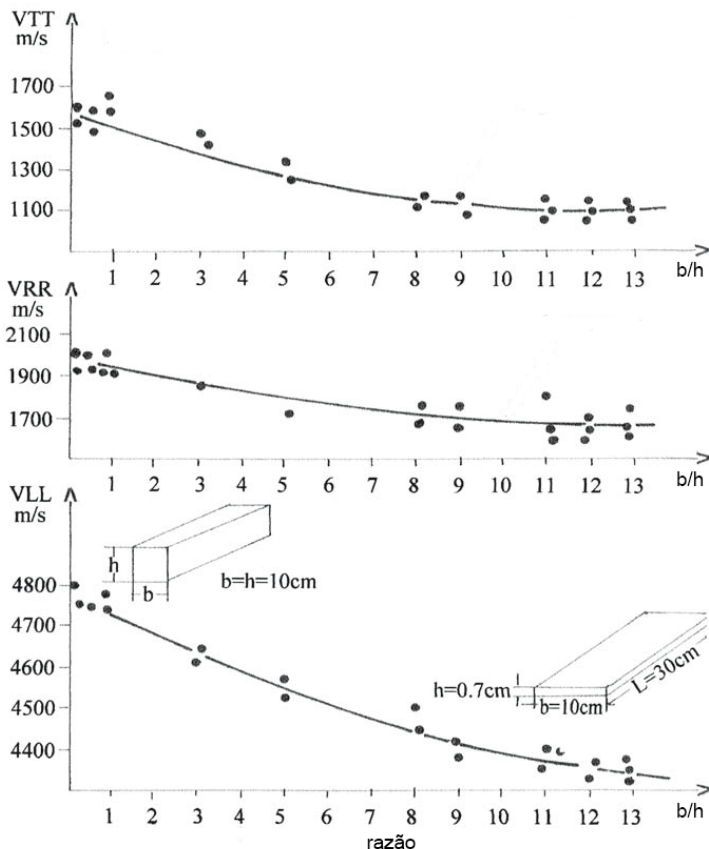


Fonte: Adaptado de AUGÉ (1990), *apud* BUCUR (2006).

### 2.7.5 Configuração geométrica da amostra

A propagação de uma onda ultrassônica na madeira está diretamente relacionada às dimensões do elemento. Bucur (1984), *apud* Bucur (2006), estudou o comportamento da velocidade ultrassônica, para a espécie *Pinus spruce*, como função da variação das dimensões da seção transversal. Os corpos de prova utilizados possuíam comprimento constante de 30 cm e seção transversal inicial de 10 cm x 10 cm. Esses corpos de prova foram repetidamente serrados para modificar a relação largura/espessura ( $b/h$ ), com  $b \geq h$ . Seus resultados são mostrados na Figura 12.

Figura 12 – Influência da seção transversal na determinação da velocidade ultrassônica para a madeira da espécie *Pinus spruce*.



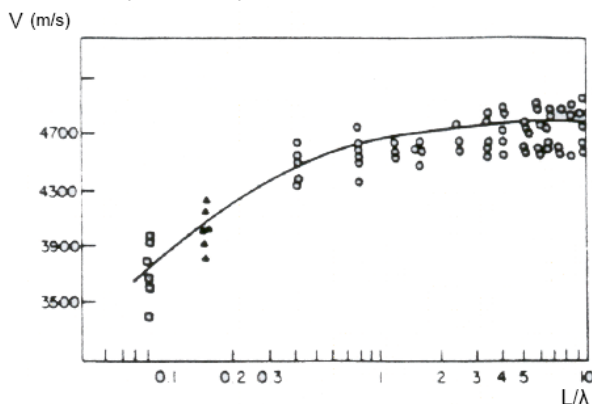
Fonte: Adaptado de BUCUR (1984) *apud* BUCUR (2006).

Comparando os gráficos obtidos por Bucur (1984), nota-se que a velocidade longitudinal ( $V_{LL}$ ) foi a que mais sofreu influência da variação da seção transversal, sendo o seu valor máximo atingido para a relação  $b/h$  compreendida entre 1 e 2 e mínimo para a relação  $b/h$  compreendida entre 13 e 14. Já os valores das velocidades radial ( $V_{RR}$ ) e tangencial ( $V_{TT}$ ) foram menos afetados pelas modificações da geometria da seção transversal, inclusive, para relações  $b/h > 10$ , não há mais influência da seção transversal nos valores de  $V_{RR}$  e  $V_{TT}$ . O fato de as velocidades radial e tangencial pouco serem influenciadas pelas modificações da seção transversal é justificado pelas dimensões dos

corpos de prova correspondentes a essas duas direções de propagação serem maiores que  $2\lambda$ .

Outro aspecto, inerente à geometria do corpo de prova e a propagação da onda ultrassônica na madeira, refere-se à relação entre a distância percorrida pela onda ( $d = L$ ) e o seu respectivo comprimento de onda ( $\lambda$ ). Bucur (1984), *apud* Bartholomeu (2001), analisou a variação da velocidade de ondas longitudinais diretas em função dessa relação ( $L/\lambda$ ), para madeira da espécie *Fagus sylvatica*, obtendo o gráfico mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Variação da velocidade de propagação de ondas longitudinais diretas em função da relação  $L/\lambda$ .



Fonte: Adaptado de BUCUR (1984) *apud* BARTHOLOMEU (2001).

Observa-se para valores de  $L/\lambda$  menores que 1, que a velocidade longitudinal apresentou uma variação mais expressiva, enquanto que para valores de  $L/\lambda$  compreendidos entre 1 e 10, a variação na velocidade foi muito menos significativa, mantendo-se, a velocidade, praticamente constante nesse intervalo.

Conforme Frederick (1965), *apud* Puccini (2002), para que a propagação da onda se dê sem interferências, é necessário que a amostra ensaiada tenha comprimento “infinito”, ou muitas vezes superior ao comprimento da onda.

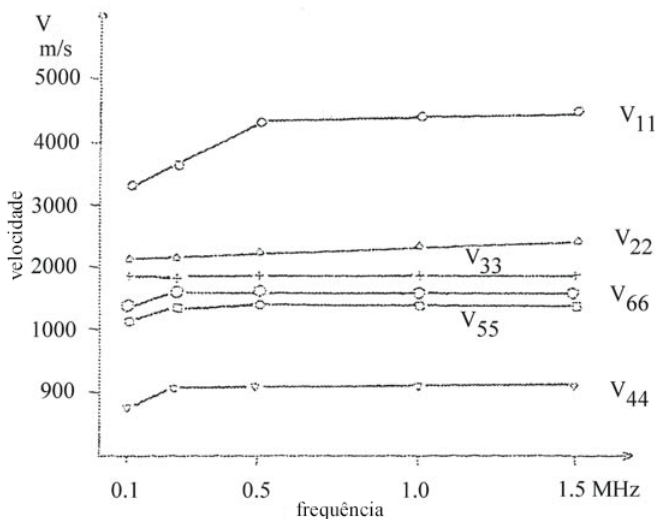
## 2.7.6 Frequência do transdutor

A influência da frequência do transdutor na determinação da velocidade ultrassônica na madeira depende, principalmente, das

dimensões dos corpos de prova escolhidas para o ensaio. Estudos realizados por alguns autores demonstram que não há muita concordância sobre esse assunto.

Estudos realizados por Bucur e Feeney (1992), *apud* Bucur (2006), para as frequências de 100, 250, 500, 1000 e 1500 kHz, mostraram que a velocidade longitudinal ( $V_{LL} = V_{11}$ ) foi a mais influenciada pela frequência de onda emitida pelo transdutor. A Figura 14 mostra os resultados obtidos nos seus experimentos.

Figura 14 – Influência da frequência na velocidade ultrassônica.



Fonte: Adaptado de BUCUR (2006).

Observa-se que a  $V_{LL} = V_{11}$  apresenta grande acréscimo no intervalo de frequência compreendido entre 100 e 500 kHz e um pequeno acréscimo para frequências acima de 500 kHz. De acordo com os autores, o valor relativamente pequeno da velocidade longitudinal obtido para a frequência de 100 kHz foi provavelmente induzido pela dispersão da onda. Já as velocidades  $V_{22} = V_{RR}$ ,  $V_{33} = V_{TT}$ ,  $V_{44} = V_{TR}$ ,  $V_{55} = V_{LT}$  e  $V_{66} = V_{LR}$  mostraram-se insensíveis à variação da frequência para frequências acima de 250 kHz.

Herzig (1992), *apud* Bartholomeu (2001), realizou ensaios de ultrassom em copos de prova com seção transversal de 2,5 cm x 2,5 cm e com comprimentos de 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5; 7,5 e 10 cm, da espécie *Épinette (Picea spp.)*, para frequências de 1 e 5 MHz. Seus resultados



mostraram que a velocidade longitudinal aumentou com o aumento da frequência até o comprimento de 5 cm. A partir desse comprimento houve um decréscimo na velocidade com o aumento da frequência, o que pode ser explicado pelo fenômeno da atenuação, o qual perturba a transmissão dos sinais e causa uma diminuição da velocidade.

No entanto, Mishiro e Miwa (1994), *apud* Bartholomeu (2001), ensaiaram corpos de prova de 10 cm de comprimento, das espécies *Picea spp.* e *Cercidiphyllum japonicum*, e não encontraram variação de velocidade com a variação de frequência (compreendida numa faixa entre 50 kHz e 5 MHz).

Bartholomeu (2001) verificou em seu trabalho que o transdutor por ele utilizado (de 45 kHz) mostrou-se eficiente para o uso em peças estruturais com comprimento mínimo de 2,00 m. De acordo com o mesmo autor, para corpos de prova com dimensões reduzidas, esse transdutor não é o mais indicado, já que o número de ondas que se propagam no interior da peça interfere na medição correta da velocidade. Nos seus experimentos, com corpos de prova de 15 cm de comprimento, verificou que para uma velocidade de 5000 m/s, a uma frequência de 45 kHz, o comprimento de onda é da ordem de 11 cm, ou seja, a leitura do tempo, nesse caso, foi realizada como menos de 2 ondas se propagando no corpo de prova. Baseado nisso, afirma que para corpos de prova com comprimento inferior a 15 cm seria ideal a utilização de transdutores com frequência igual ou superior a 150 kHz.

### **2.7.7 Defeitos da madeira**

Defeitos são irregularidades ou imperfeições indesejadas na madeira, que podem afetar as propriedades físicas e mecânicas, limitando sua utilização (CALIL JÚNIOR, [s.d.]). Assim sendo, a análise da influência desse fator na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas na madeira possui uma importância fundamental, visto que a possível detecção de defeitos nas inspeções fornece informações indispensáveis para a avaliação do estado de conservação de elementos estruturais.

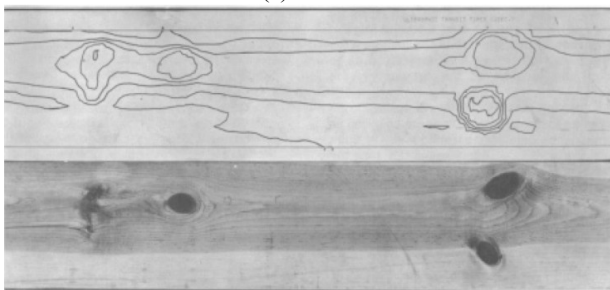
McDonald *et al.* (1969) utilizaram a técnica do ultrassom para localizar defeitos em madeira serrada e concluíram que o método aplicado funcionou relativamente bem na detecção de nós e desvio de grã. Inferiram também que pesquisas adicionais são necessárias para verificar a confiabilidade nessa técnica, bem como mais análises para cobrir a ampla variação que existe desses tipos de defeitos.

Em estudo similar, McDonald (1978) comprovou a eficiência do método, utilizando um equipamento controlado por computador, construído para testar e demonstrar o princípio da técnica de detecção de defeitos em madeira por meio do ultrassom. A água foi utilizada como acoplante. O sistema desenvolvidor, que proporcionava o posicionamento e o controle preciso dos transdutores por meio de um computador, e os gráficos obtidos para uma peça de madeira estão mostrados na Figura 15. Embora não esteja quantificado na imagem, as linhas de contorno representam valores iguais de tempo de percurso da onda, mostrando boa correlação com a inspeção visual.

Figura 15 – Equipamento (a) e gráficos de contorno do tempo de percurso das ondas, mostrando a estreita correlação com uma imagem real da peça (b).



(a)



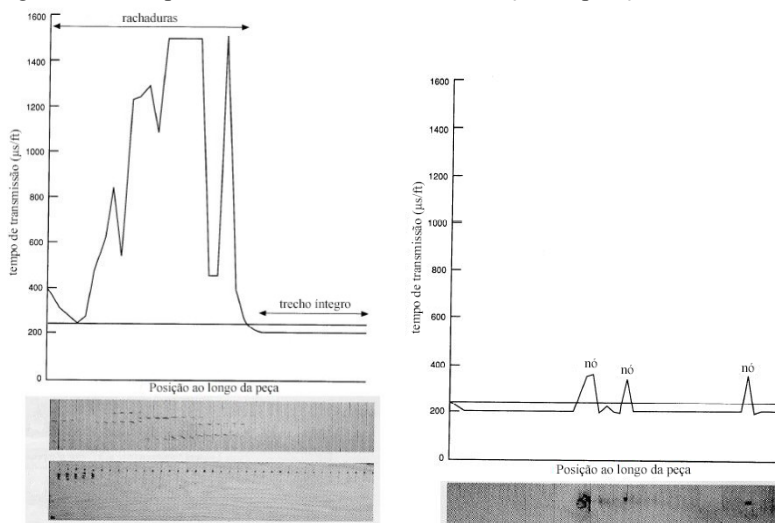
(b)

Fonte: McDONALD (1978).

Fuller *et al.* (1994) observaram, em tábuas de carvalho vermelho, que a velocidade de propagação das ondas perpendiculares às fibras diminuiu consideravelmente, após a secagem, nos locais onde se formaram rachaduras internas e superficiais, se comparadas com regiões íntegras das peças. Já a presença de nós resultou num pequeno e localizado aumento do tempo, com consequente diminuição de velocidade de propagação da onda ultrassônica (Figura 16). Também consideram a técnica do ultrassom promissora na inspeção de tábuas

secas, com o intuito de detectar os defeitos, como os por eles encontrados.

Figura 16 – Tempo de transmissão da onda em função da posição.



Fonte: Adaptado de FULLER *et al.* (1994).

Emerson *et al.* (2001) realizaram o mapeamento de uma peça de madeira laminada colada, produzida com defeitos artificiais (vazios internos), que não foram inicialmente especificados aos pesquisadores. Constataram que a inspeção ultrassônica foi razoável na identificação dessas lacunas. Vazios maiores, com dimensões da mesma ordem de grandeza das lâminas, foram positivamente identificados e localizados, enquanto que os pequenos, com aproximadamente 1,3 cm de diâmetro, apenas alguns. A inspeção na peça, composta por 11 lâminas de 22,2 cm x 121,9 cm x 3,8 cm, forneceu somente alguns falsos positivos.

Shaji *et al.* (2000), *apud* Teixeira (2009), utilizaram a técnica do ultrassom para avaliar a integridade estrutural de elementos de madeira em edifícios históricos e, por meio de análises laboratoriais em diversas espécies de madeira, concluíram que os defeitos internos, como rachaduras e descontinuidades, reduzem a velocidade de propagação do pulso ultrassônico.

Bartholomeu (2001) concluiu a partir da análise de seus experimentos, que a presença de nós e desvios de grã em madeira da espécie *Pinus elliottii* perturba a propagação da onda ultrassônica na

direção longitudinal de modo significativo. Já as espécies *Goupia glabra* e *Eucalyptus citriodora*, de estrutura mais homogênea, apresentaram menor perturbação na propagação da onda ultrassônica, havendo menor diferenciação nos valores obtidos para as velocidades. Observou-se que as velocidades para a madeira seca ao ar foram 3% maiores nos corpos-de-prova, em relação às vigas, para a *Goupia glabra*, 4% maiores para o *Eucalyptus citriodora* e 8% maiores para o *Pinus elliottii*. Esses resultados indicam o grau de homogeneidade (relativo à presença de defeitos) da madeira.

Puccini (2002) analisou a sensibilidade da técnica do ultrassom na detecção de presença de nós e medula e de desvio de grã em peças de madeira para aplicação industrial (espécie *Pinus taeda*) e constatou, a partir de análise estatística de dados experimentais, que a velocidade do pulso foi significativamente influenciada pela presença desses defeitos e que, portanto, a técnica poderá ser utilizada como ferramenta de análise para a detecção de defeitos na madeira. Também observou que a presença de nós foi o parâmetro de maior influência na velocidade de propagação ultrassônica na direção longitudinal: a velocidade média para a madeira com nós foi 17% inferior à velocidade média para a madeira sã.

Teles (2002) explorou o uso de ensaios não destrutivos de ultrassom para determinação das propriedades mecânicas de madeiras deterioradas por cupins, porém não obteve conclusões definitivas. Foram avaliados corpos de prova de *Eucalyptus spp.* e *Pinus spp.*, íntegros e expostos aos cupins da espécie *Coptotermes havilandi*. Constatou-se que a reduzida perda de massa causada pelos cupins após 40 dias de ação não alterou significativamente as propriedades mecânicas dos elementos biodeteriorados testados, não permitindo a identificação de correlações entre esses parâmetros e a velocidade ultrassônica. Adicionalmente, comprovou a necessidade do uso de acoplante entre o corpo de prova e o transdutor de faces planas utilizado em sua pesquisa para a obtenção de velocidades ultrassônicas mais estáveis.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da etapa experimental deste trabalho, a qual contempla a execução de ensaios não destrutivos de ultrassom em elementos de madeira, na tentativa de atingir os objetivos descritos.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Madeira

As espécies de madeira adotadas na pesquisa foram Pinus (*Pinus elliottii*), com massa específica aparente de  $400 \text{ kg/m}^3$  ao teor de umidade de 15 %, proveniente de floresta plantada em Santa Catarina, e Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*), com massa específica aparente de  $620 \text{ kg/m}^3$  ao teor de umidade de 14 %, proveniente de floresta nativa da região Norte do Brasil.

Optou-se pelas espécies citadas, cujas propriedades anatômicas são bem diferentes, para analisar de maneira mais abrangente o comportamento dos ensaios de ultrassom (velocidade de propagação da onda) na detecção de defeitos: uma madeira resinosa com densidade baixa e com abundante presença de nós (pinus), e outra, folhosa, com densidade relativamente elevada e escassa presença de nós (angelim pedra). Além disso, a escolha das espécies e das dimensões das peças de madeira também levou em consideração a disponibilidade comercial e a aplicabilidade das mesmas. As peças de pinus e angelim pedra (Figura 17) foram adquiridas nas madeireiras Florianópolis Ltda. e Madekalo Ltda., respectivamente.

Figura 17 – Peças de pinus e angelim pedra utilizadas na pesquisa.

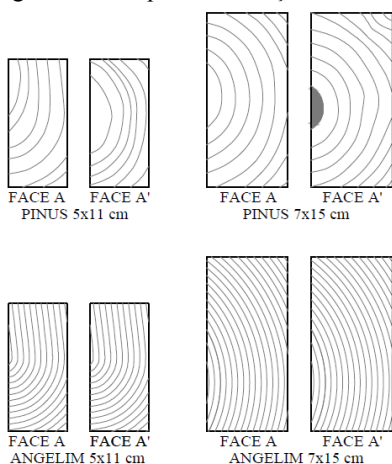


Fonte: Acervo próprio.

### 3.1.2 Amostras e corpos de prova

Para a execução dos ensaios de ultrassom e de umidade foram utilizados 4 corpos de prova, sendo 2 de cada espécie. Os elementos, já previamente aplainados pelos fornecedores, apresentavam comprimento de 300 cm e seções transversais de 5 cm x 11 cm e 7 cm x 15 cm (Figura 18), para as duas espécies estudadas. A escolha dessas dimensões procurou se aproximar das dimensões utilizadas em elementos estruturais de madeira na prática. Além dos motivos citados, essas configurações geométricas também foram adotadas pois a propagação de ondas ultrassônicas na madeira pode ser influenciada, entre outros fatores, pelo comprimento da peça e pelo tamanho e formato da seção transversal (relação base/altura).

Figura 18 – Esquema das seções transversais dos elementos.

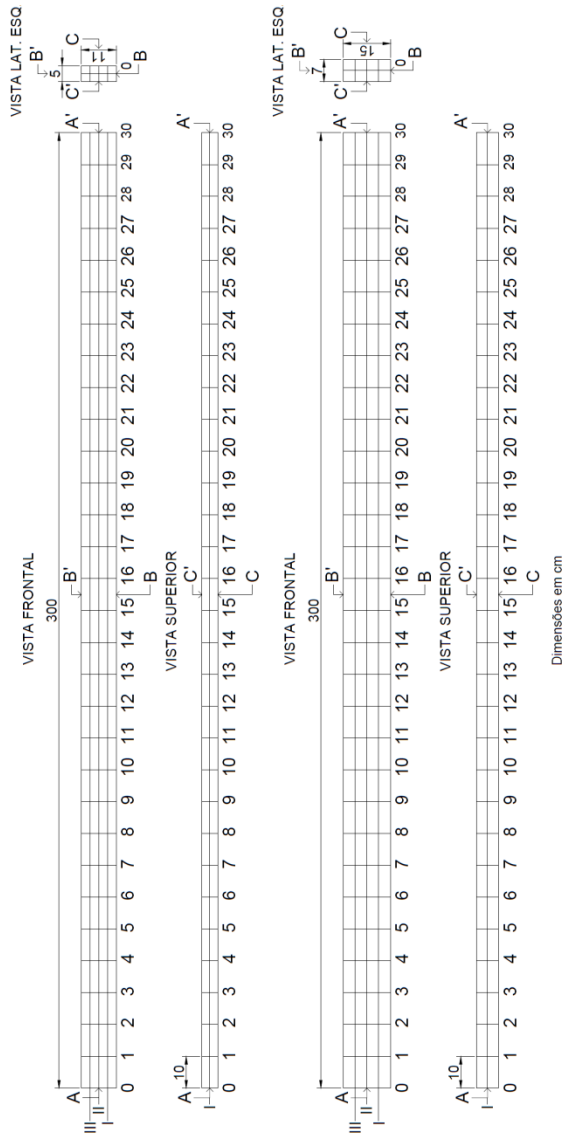


Fonte: Acervo próprio.

Os corpos de prova foram identificados e mapeados conforme a Figura 19 a seguir. As faces dos corpos de prova prismáticos são representadas por A, A', B, B', C e C'. As colunas, de 0 a 30, com espaçamento de 10 cm entre elas, identificam a localização das seções transversais ao longo do comprimento de cada corpo de prova. Para cada face dos corpos de prova, os algarismos I, II e III indicam as linhas, as quais são equidistantes entre si. Com essa malha criada, desenhada à lápis nos corpos de prova, tem-se uma configuração similar a de uma matriz para cada face dos corpos de prova. Essa nomenclatura foi criada

com a intenção de facilitar a execução e a visualização dos ensaios realizados, assim como a interpretação dos resultados.

Figura 19 – Mapeamento dos corpos de prova.



Fonte: Acervo próprio.

Assim, como será detalhado adiante para cada caso, as leituras de ultrassom são identificadas pelas faces, linhas e colunas nas quais os transdutores estão posicionados. Como exemplos: a leitura C-C'-3-II, corresponde a leitura obtida com um transdutor posicionado na face C, coluna 3, linha II, e outro posicionado na face C', coluna 3, linha II; já a leitura C-C-4-5-I, corresponde a leitura obtida com um transdutor posicionado na face C, coluna 4, linha I, e outro posicionado na face C, coluna 5, linha I.

### 3.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

Com o propósito de não alterar a integridade dos corpos de prova utilizados nos ensaios de ultrassom, a umidade dos mesmos também foi obtida por método não destrutivo.

Com isso e aproveitando a disponibilidade de equipamentos do GIEM da UFSC, para a determinação do teor de umidade dos corpos de prova foi utilizado o método elétrico. A determinação da umidade por esse método foi feita com a utilização do medidor de umidade (higrômetro) modelo H-DI-3.10 da BES-BOLLMANN. Para esse medidor, o princípio de medição de umidade é baseado na resistividade do material. O medidor de umidade é calibrado segundo a temperatura ambiente local e a espécie da madeira. Nesse ensaio de umidade são cravadas duas hastes (eletrodos) de pequeno diâmetro no corpo de prova e com isso o equipamento indica um valor do teor de umidade, baseado no parâmetro físico da resistividade. As leituras de umidade sempre foram realizadas em todas as seções (colunas de 1 a 29) das peças, pois essas leituras são pontuais, tentando assim avaliar a condição de umidade da peça como um todo.

A determinação do teor de umidade foi realizada antes de cada ensaio de ultrassom, pois se entendeu que o gel remanescente desse ensaio poderia alterar a resistência elétrica dos corpos de prova, afetando os resultados de umidade.

### 3.3 ENSAIOS DE ULTRASSOM

As leituras dos tempos de propagação dos pulsos ultrassônicos, realizadas em todos os corpos de prova, serão detalhadas caso a caso com o propósito de explicar claramente os ensaios realizados.

O equipamento utilizado para a emissão de ondas ultrassônicas foi o PUNDIT 6 (*Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital*



*Indicating Tester*), produzido na Inglaterra pela antiga CNS Farnell Ltd., adquirida pela Proceq SA no ano de 2009, mostrado na Figura 20.

Figura 20 – PUNDIT 6.



Fonte: Acervo próprio.

Possui resolução de  $0,1 \mu\text{s}$  e dois pares de transdutores de onda longitudinal cilíndricos com frequências de 200 kHz ( $\varphi = 2 \text{ cm}$ ) e 54 kHz ( $\varphi = 5 \text{ cm}$ ). Além desses transdutores do PUNDIT 6, foram utilizados também transdutores de onda longitudinal cônica, de 30 kHz (pontual), de outro aparelho, o Sylvatest, porém conectados ao PUNDIT 6. Esses três pares de transdutores são mostrados na Figura 21.

Figura 21 – Transdutores de 200 kHz, 54 kHz e 30 kHz.



Fonte: Acervo próprio.

Para a melhor acoplagem dos transdutores aos corpos de prova foi utilizado o gel condutor para ultrassom Plurigel, da marca Carbogel. O não uso do acoplante permite que uma fina camada de ar se aloje entre o corpo de prova e os transdutores. Essa camada de ar é muito pouco condutora e portanto pode ocasionar oscilações nas leituras. Assim, ela deve ser evitada, a fim de se obter um melhor desempenho nos ensaios de ultrassom.

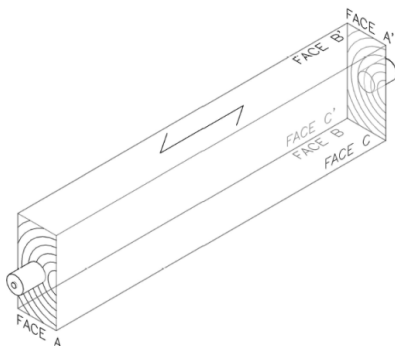
Antes da realização dos ensaios, o equipamento foi calibrado com um cilindro metálico que o acompanha conforme especificação do fabricante. Bastava posicionar os transdutores nas faces planas do cilindro (de topo), com o uso do gel acoplante, e girar um botão de referência até o mostrador indicar  $25,7 \mu\text{s}$  (tempo de propagação da onda no cilindro). Cabe salientar que para os transdutores de 30 kHz, por mais que o botão de referência tenha sido girado, o valor de  $25,7 \mu\text{s}$  não aparecia no visor e sim, apenas valores superiores a  $49,0 \mu\text{s}$ . Assim, optou-se por girar o botão de referência até a indicação de  $55,7 \mu\text{s}$  antes de iniciar as leituras. Portanto, foi descontado o valor de  $55,7 \mu\text{s} - 25,7 \mu\text{s} = 30,0 \mu\text{s}$ , de cada leitura realizada nos corpos de prova de madeira com esse par de transdutores cônicos.

Os ensaios de ultrassom desse trabalho são compostos, basicamente, por duas fases distintas. A primeira contempla a realização de um mapeamento, de acordo com a malha anteriormente apresentada, dos elementos de madeira, com o intuito principal de detectar defeitos, como por exemplo, a presença de nós. A segunda possui, essencialmente, o mesmo objetivo, porém será avaliada a sensibilidade do ultrassom na detecção de uma fenda artificial na direção transversal. Para se transmitir com clareza as fases do desenvolvimento desta pesquisa, os ensaios de ultrassom foram abordados como se segue.

### **3.3.1 Ensaio A-A': longitudinal direto**

Neste ensaio, realizado em todos os corpos de prova, com os três transdutores (30kHz, 54 kHz e 200 kHz), foram feitas três medidas de ultrassom para cada peça, uma em cada linha (I, II e III). Esse tipo de leitura caracteriza-se como uma leitura direta. Obteve-se assim o tempo de propagação da onda ultrassônica na direção longitudinal, posicionando os transdutores nos topos dos corpos de prova (leitura topo a topo, faces 0 e 30 dos corpos de prova), como pode ser observado na Figura 22. Portanto, identificaram-se esses ensaios como A-A'-0-30-I, A-A'-0-30-II e A-A'-0-30-III.

Figura 22 – Ensaio A-A': posicionamento dos transdutores.

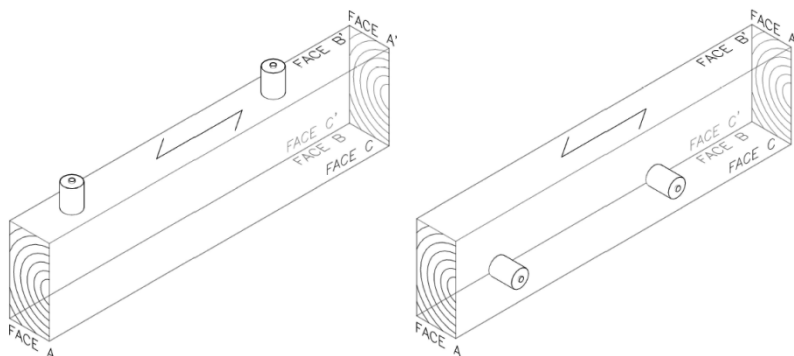


Fonte: Acervo próprio.

### 3.3.2 Ensaio B e B' / C e C': longitudinal indireto fixo

Este ensaio foi realizado apenas nos corpos de prova com seção de 5 cm x 11 cm, pois, como será visto, à grandes distâncias a captura do pulso tornou-se difícil. Para a execução desses ensaios, os transdutores (de 54 kHz e 200 kHz) foram posicionados em todas as faces laterais dos corpos de prova, variando a distância entre eles em intervalos de 10 cm na direção longitudinal, mantendo-se sempre um fixo a 10 cm da face A (Figura 23). As faces B e B' contemplavam uma linha de leitura (I) cada, enquanto que as faces C e C' contemplavam três (I, II e III). Logo, identificaram-se as leituras como B-B-1-2-I, B-B-1-3-I, ..., C-C-1-2-I, C-C-1-2-II, C-C-1-2-III, C-C-1-3-I, ... e assim por diante.

Figura 23 – Ensaio B e B' / C e C' fixo: posicionamento dos transdutores.

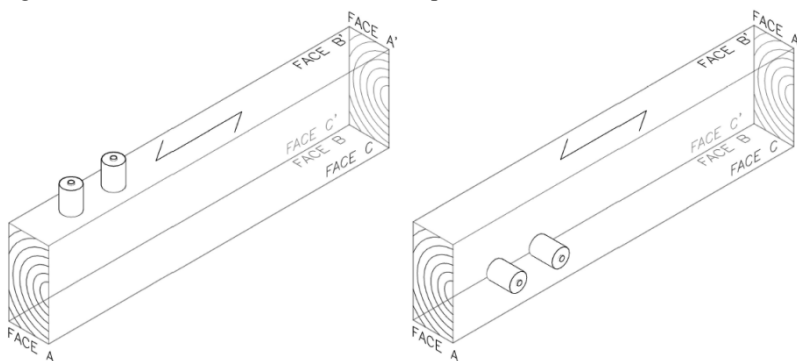


Fonte: Acervo próprio.

### 3.3.3 Ensaio B e B' / C e C': longitudinal indireto móvel

Este ensaio foi realizado em todos os corpos de prova. Para a obtenção das leituras, os transdutores (de 30 kHz, 54 kHz e 200 kHz) foram posicionados em todas as faces laterais dos corpos de prova, mantendo-se constante a distância entre eles (10 cm) e variando-se, na direção longitudinal, de 10 cm em 10 cm a posição do conjunto (emissor-receptor), percorrendo toda a extensão das peças (Figura 24). Como no ensaio anterior, as faces B e B' contemplavam uma linha de leitura (I) cada, enquanto que as faces C e C' contemplavam três (I, II e III). Com isso, identificaram-se as leituras como B-B-1-2-I, B-B-2-3-I, ..., C-C-1-2-I, C-C-1-2-II, C-C-1-2-III, C-C-2-3-I, ... e assim por diante.

Figura 24 – Ensaio B e B' / C e C' móvel: posicionamento dos transdutores.



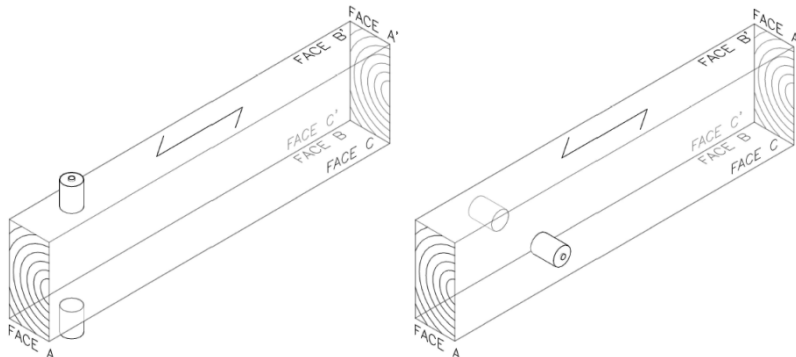
Fonte: Acervo próprio.

### 3.3.4 Ensaio B-B' / C-C': transversal direto

Também realizado em todos os corpos de prova, este ensaio difere do primeiro descrito pelo fato de a propagação do pulso dar-se perpendicularmente ao eixo da peça. Os transdutores (de 30 kHz, 54 kHz e 200 kHz) foram posicionados em faces laterais opostas dos corpos de prova para a realização das leituras. A distância entre os transdutores correspondia à altura e a largura da peça para os ensaios B-B' e C-C', respectivamente (Figura 25). Aqui também variou-se, na direção longitudinal, de 10 cm em 10 cm a posição do conjunto (emissor-receptor), percorrendo toda a extensão da peça. As faces B e B' contemplavam uma linha de leitura (I) cada, enquanto que as faces C e C' contemplavam três (I, II e III). As leituras foram identificadas por

B-B'-1-1-I, B-B'-2-2-I, ..., C-C'-1-1-I, C-C'-1-1-II, C-C'-1-1-III, C-C'-2-2-I, ... e assim por diante.

Figura 25 – Ensaio B-B' / C-C': posicionamento dos transdutores.



Fonte: Acervo próprio.

As imagens apresentadas na descrição da primeira fase dos ensaios (mapeamento) são esquemas básicos para facilitar a visualização dos ensaios (para a execução dessas gravuras foi utilizado como exemplo uma seção transversal genérica). A terminologia, bem como o posicionamento exato dos transdutores é resultado da Figura 19 já apresentada. Adicionalmente, para cada ensaio realizado, foram realizadas duas leituras de tempo.

### 3.3.5 Ensaio da influência de uma fenda artificial

Esta fase teve como objetivo analisar a influência de uma fenda artificial transversal na velocidade de propagação da onda ultrassônica no corpo de prova de 7 cm x 15 cm x 300 cm da espécie *Pinus elliottii*. A escolha dessa peça, bem como da localização da fenda e da frequência do transdutor (200 kHz) foram baseadas nos resultados obtidos na fase anterior e também na dimensão dessa peça e do transdutor. A fenda foi executada com serra circular, em uma região da peça na qual se obtiveram leituras estáveis.

Dividiu-se o ensaio em quatro etapas. A etapa 0 correspondeu à peça íntegra e as demais etapas foram classificadas em função da profundidade (e) da fenda (Quadro 1). A espessura adotada para a fenda foi de 5,0 mm.

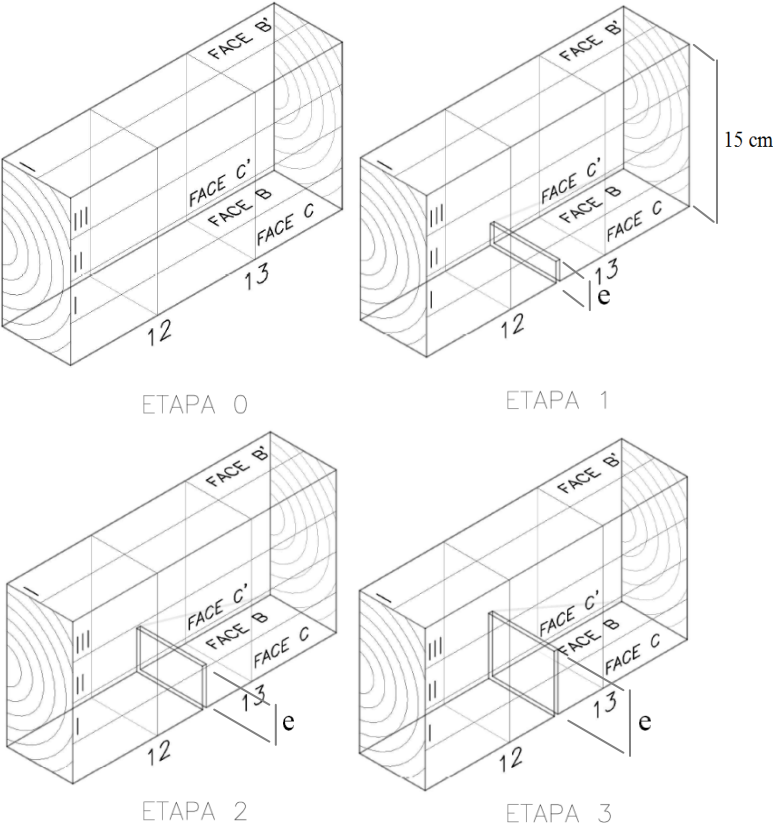
Quadro 1 – Profundidade (e) da fenda

Etapa	Profundidade (cm)
0	-
1	2,0
2	4,0
3	6,0

Fonte: Acervo próprio.

A fenda transversal foi executada na face B, entre as seções (colunas) 12 e 13 do referido corpo de prova (Figura 26). As leituras estáveis obtidas nessa região foram um dos fatores determinantes nessa escolha. As novas leituras, então, foram nas mesmas posições da fase anterior, porém com os transdutores posicionados somente nas seções 12 e 13.

Figura 26 – Ensaio fenda transversal: etapas (em escala).



Fonte: Acervo próprio.





## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos utilizando-se a metodologia detalhada no Capítulo 3, bem como as análises realizadas.

### 4.1 ENSAIO A-A': LONGITUDINAL DIRETO

#### 4.1.1 *Pinus elliottii*: 5 cm x 11 cm x 300 cm / 7 cm x 15 cm x 300 cm

Os resultados obtidos nos ensaios topo a topo realizados nos corpos de prova de *Pinus elliottii* estão exibidos no Quadro 2.

Quadro 2 – Velocidades longitudinais diretas: *Pinus elliottii*.

Ensaio longitudinal direto						
CP	T	Grandeza	A-A' I	A-A' II	A-A' III	Média
Pinus 5x11	200 kHz	V (m/s)	4424,1	4411,1	4355,7	4397,0
		U (%)	14,4%			
	54 kHz	V (m/s)	4590,7	4603,3	4666,4	4620,1
		U (%)	14,4%			
	30 kHz	V (m/s)	4401,4	4402,1	4421,5	4408,3
		U (%)	14,4%			
Pinus 7x15	200 kHz	V (m/s)	4862,2	4838,7	4838,7	4846,6
		U (%)	14,1%			
	54 kHz	V (m/s)	5042,0	4983,4	5000,0	5008,5
		U (%)	14,1%			
	30 kHz	V (m/s)	4983,4	4958,7	4975,1	4972,4
		U (%)	14,1%			

Fonte: Acervo próprio.

Nota-se que as velocidades obtidas para o maior corpo de prova foram maiores que as obtidas para o menor. Um dos motivos pode estar relacionado à relação largura/espessura do corpo de prova. Para o corpo de prova com seção de 5 cm x 11 cm essa relação é 2,20, enquanto que para o corpo de prova com seção de 7 cm x 15 cm essa relação é 2,14. Porém acredita-se que a influência dessa relação tenha sido mínima e que, a presença de medula na maior peça possa ter sido a responsável por tamanha diferença observada, assim como as demais não homogeneidades. Entretanto, ressalta-se pouco se pode concluir em virtude do pequeno número de ensaios realizados (apenas 3 leituras para cada corpo de prova com cada transdutor). Como comparação, Bartholomeu (2001) obteve para vigas estruturais de *Pinus elliottii*, uma

velocidade média de 4550 m/s, para um transdutor de 45 kHz (mínima de 3631 m/s e máxima 5280 m/s). Portanto, as velocidades aqui obtidas encontram-se dentro do mesmo intervalo observado por Bartholomeu (2001).

#### 4.1.2 *Hymenolobium petraeum*: 5 cm x 11 cm x 300 cm / 7 cm x 15 cm x 300 cm

Os resultados obtidos nos ensaios topo a topo realizados nos corpos de prova de *Hymenolobium petraeum* estão exibidos no Quadro 3.

Quadro 3 – Velocidades longitudinais diretas: *Hymenolobium petraeum*.

Ensaio longitudinal direto						
CP	T	Grandeza	A-A' I	A-A' II	A-A' III	Média
Angelim P. 5x11	200 kHz	V (m/s)	5023,0	5078,3	5137,4	5079,6
		U (%)	13,2%			
	54 kHz	V (m/s)	5086,0	5138,7	5184,9	5136,6
		U (%)	13,2%			
	30 kHz	V (m/s)	4971,0	5067,6	5102,0	5046,9
		U (%)	13,2%			
Angelim P. 7x15	200 kHz	V (m/s)	5501,6	5425,9	5405,4	5444,3
		U (%)	13,5%			
	54 kHz	V (m/s)	5536,6	5500,0	5425,4	5487,4
		U (%)	13,5%			
	30 kHz	V (m/s)	5454,5	5426,4	5359,5	5413,5
		U (%)	13,5%			

Fonte: Acervo próprio.

Novamente se observa que as velocidades obtidas para o maior corpo de prova foram maiores e também pouco se pode concluir com os resultados obtidos com essa modalidade de ensaio em virtude do pequeno número de leituras realizadas e também da quantidade de fatores que podem às ter influenciadas.

No geral, se observou que as velocidades obtidas para o Angelim pedra foram superiores as obtidas para o Pinus. Os motivos podem estar relacionados à diferença de densidade entre as espécies (Angelim pedra - 620 kg/m<sup>3</sup> / Pinus - 400 kg/m<sup>3</sup>), à presença de nós (maior nos corpos de prova de Pinus) e à diferente constituição do lenho das espécies.

## 4.2 ENSAIO B e B' / C e C': LONGITUDINAL INDIRETO FIXO

### 4.2.1 *Pinus elliottii*: 5 cm x 11 cm x 300 cm

Os resultados obtidos para essa modalidade de ensaio para o menor corpo de prova de *Pinus elliottii* estão exibidos no Apêndice A-3.

Nessa modalidade de ensaio os resultados obtidos com o transdutor de 200 kHz mostraram-se instáveis. Para esse transdutor não se observou nenhum indicativo de uma linearidade constante da velocidade da onda. Já os resultados obtidos a partir do transdutor de 54 kHz mostraram-se mais estáveis, com menores coeficientes de variação. Observou-se nas primeiras leituras para esse transdutor uma expressiva variação nos valores de velocidade, possivelmente influenciada pela baixa relação  $L/\lambda$  nesse intervalo. A partir de relações de  $L/\lambda = 4,0$ , as velocidades variaram menos em comparação à relações inferiores de  $L/\lambda$  para esse transdutor nesse tipo de leitura.

### 4.2.2 *Hymenolobium petraeum*: 5 cm x 11 cm x 300 cm

Os resultados obtidos para essa modalidade de ensaio para o menor corpo de prova de *Hymenolobium petraeum* estão exibidos no Apêndice C-3.

Para o Angelim pedra valem as mesmas observações feitas para o *Pinus* para ambos os transdutores de 200 kHz e 54 kHz, contudo foram observadas menores variações nas leituras realizadas e os trechos com velocidades estáveis para o transdutor de 54 kHz foram mais longos. Essa diferença pode estar na presença de uma quantidade maior de não homogeneidades nas peças de *Pinus*.

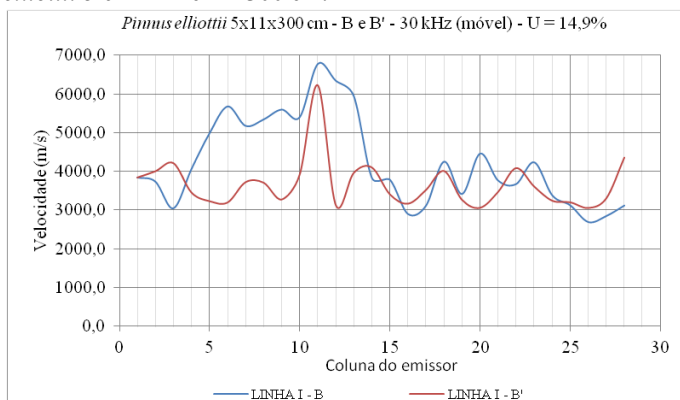
De modo geral, acredita-se que não se pode avaliar mais criteriosamente esses resultados somente com esses ensaios de ultrassom, visto que a partir de determinadas distâncias, que variaram em função da espécie, do corpo de prova, da face e do transdutor utilizado, o tempo de captura do pulso tornou-se muito difícil (grandes oscilações foram observadas no visor do equipamento de ultrassom). Embora essas oscilações possam estar relacionadas ao fenômeno da atenuação (o que inclusive faz sentido, visto que como comentado na Revisão Bibliográfica, quanto maior a frequência, maior a atenuação, e, nesse trabalho, observou-se isso, visto que as leituras obtidas com o transdutor de maior frequência (200 kHz) oscilaram muito mais se comparadas com as leituras efetuadas com o transdutor de 54 kHz), uma análise mais completa é necessária para melhor entender esse fenômeno.

### 4.3 ENSAIO B e B' / C e C': LONGITUDINAL INDIRETO MÓVEL

#### 4.3.1 *Pinus elliottii*: 5 cm x 11 cm x 300 cm / 7 cm x 15 cm x 300 cm

Os resultados obtidos para as velocidades longitudinais indiretas nessa modalidade de ensaio (na qual os transdutores percorrem as 4 faces laterais dos corpos de prova ao longo da sua extensão, mantendo-se uma distância constante de 10 cm entre os mesmos) em ambos os corpos de prova de *Pinus*, mostraram-se muito sensíveis em função do transdutor utilizado. Para o transdutor de 30 kHz não foram obtidas leituras estáveis à 90° em nenhuma das 4 faces laterais, por isso o mesmo só foi utilizado no menor corpo de prova. A Figura 27 ilustra o comportamento das velocidades obtidas com esse transdutor, no menor corpo de prova (faces B e B') e os gráficos dos Apêndices A-1 e B-1 ilustram todos os resultados obtidos para a espécie *Pinus elliottii*.

Figura 27 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 30 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.



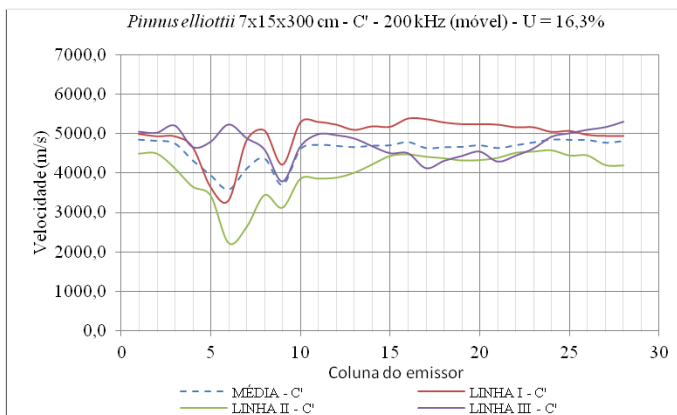
Fonte: Acervo próprio.

Para o corpo de prova de 5 cm x 11 cm x 300 cm, os ensaios realizados nas faces B e B' com os transdutores de 200 kHz e 54 kHz diferiram não somente nos valores médios encontrados para as velocidades, como também no aspecto do gráfico resultante (Velocidade x Coluna do emissor). Acredita-se que as diferentes conformações observadas nos gráficos sejam resultantes do contato entre o transdutor de 54 kHz, que tem 5 cm de diâmetro, e as faces ensaiadas, com largura equivalente. Já para o corpo de prova de 7 cm x 15 cm x 300 cm os

gráficos apresentaram aspecto semelhante, visto que a largura das faces em contato com os transdutores possuía 7 cm. Já quanto aos valores das velocidades, a diferença pode estar relacionada à curta distância entre os transdutores.

Para o ensaio realizado nas faces C e C' as velocidades obtidas na face C foram superiores às obtidas na face C' para os dois corpos de prova, independente do transdutor utilizado (de 200 kHz ou 54 kHz). No menor corpo de prova, as medidas realizadas na face C tiveram a mesma conformação para ambos os transdutores, embora seus valores tenham apresentado grande divergência. O mesmo se observou para a face C'. Para o corpo de prova de 7 cm x 15 cm x 300 cm, o mesmo pode se concluir. Ressalta-se que nesse corpo de prova, a presença de medula no trecho inicial da face C' provocou uma redução notável nas velocidades, como pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C' - 200 kHz - *Pinus elliottii* 7 cm x 15 cm x 300 cm.



Fonte: Acervo próprio.

Os Quadros 4 e 5 apresentam os valores médios das velocidades obtidas para as quatro faces dos corpos de prova, o coeficiente de variação (CV) para cada velocidade e o teor de umidade (U) do corpo de prova no momento do ensaio.

Quadro 4 – Resumo dos ensaios longitudinais B e B' (móvel): *Pinus elliottii*.

Ensaio longitudinal móvel				
CP	T	Grandeza	B I	B' I
Pinus 5x11	200 kHz	V (m/s)	5252,5	5495,2
		CV (%)	7,9%	7,9%
		U (%)	15,5%	15,5%
	54 kHz	V (m/s)	6450,5	6409,8
		CV (%)	5,4%	6,0%
		U (%)	15,5%	15,5%
	30 kHz	V (m/s)	4236,4	3664,8
		CV (%)	27,2%	17,3%
		U (%)	14,9%	14,9%
Pinus 7x15	200 kHz	V (m/s)	5214,6	5212,3
		CV (%)	11,7%	4,6%
		U (%)	16,3%	16,3%
	54 kHz	V (m/s)	6457,8	6566,7
		CV (%)	10,0%	3,7%
		U (%)	13,9%	13,9%

Fonte: Acervo próprio.

Quadro 5 – Resumo dos ensaios longitudinais C e C' (móvel): *Pinus elliottii*.

Ensaio longitudinal móvel								
CP	T	Grandeza	C I	C II	C III	C' I	C' II	C' III
Pinus 5x11	200 kHz	V (m/s)	5019,4	4957,9	5159,0	4417,5	3738,7	4049,4
		CV (%)	11,0%	10,8%	9,5%	6,7%	9,1%	8,6%
		U (%)	15,7%	15,7%	15,7%	15,7%	15,7%	15,7%
	54 kHz	V (m/s)	6240,4	6278,3	6526,4	5721,2	5028,0	5298,1
		CV (%)	9,8%	10,5%	9,1%	6,4%	8,5%	7,3%
		U (%)	14,4%	14,4%	14,4%	14,4%	14,4%	14,4%
	30 kHz	V (m/s)	4573,1	4037,2	3956,1	3904,2	3994,4	3645,0
		CV (%)	29,8%	33,3%	27,2%	26,9%	16,0%	23,9%
		U (%)	15,3%	15,3%	15,3%	15,3%	15,3%	15,3%
Pinus 7x15	200 kHz	V (m/s)	5408,4	5245,4	5217,3	4954,5	4031,4	4729,5
		CV (%)	5,4%	7,9%	10,5%	9,8%	14,7%	7,7%
		U (%)	16,3%	16,3%	16,3%	16,3%	16,3%	16,3%
	54 kHz	V (m/s)	6591,1	6469,1	6477,4	6043,7	5193,8	5826,7
		CV (%)	4,6%	7,5%	8,6%	8,3%	11,4%	7,6%
		U (%)	15,6%	15,6%	15,6%	15,6%	15,6%	15,6%

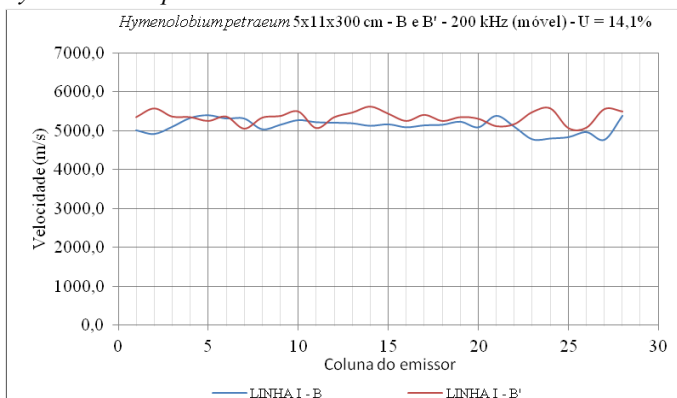
Fonte: Acervo próprio.

### 4.3.2 *Hymenolobium Petraeum*: 5 cm x 11 cm x 300 cm / 7 cm x 15 cm x 300 cm

Os resultados obtidos para as peças de Angelim pedra também se mostraram sensíveis em função do transdutor utilizado. O transdutor de 30 kHz novamente propiciou leituras instáveis (para as 4 faces ensaiadas) quando posicionado à 90° da superfície, sendo também utilizado por esse motivo somente no menor corpo de prova. Os gráficos dos Apêndices C-1 e D-1 ilustram todos os resultados obtidos para a espécie *Hymenolobium Petraeum*.

Para o corpo de prova de 5 cm x 11 cm x 300 cm os resultados obtidos nos ensaios realizados nas faces B e B' com os transdutores de 200 kHz são exibidos na Figura 29. O aspecto observado nesse gráfico para ambas as faces não se repetiu para o transdutor de 54 kHz, assim como observado no Pinus e provavelmente pelo mesmo motivo: largura de contato entre o transdutor e o corpo de prova igual ao diâmetro do transdutor. Já para o corpo de prova de 7 cm x 15 cm x 300 cm os resultados obtidos com esses transdutores tiveram a mesma conformação, embora as velocidades obtidas para cada transdutor divergissem.

Figura 29 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 200 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.



Fonte: Acervo próprio.

Para o ensaio longitudinal realizado nas faces C e C' no menor corpo de prova a conformação observada nos gráficos foi semelhante, independente do transdutor utilizado, entretanto as velocidades obtidas

com o transdutor de 54 kHz foram superiores às obtidas com o de 200 kHz. No corpo de prova de 7 cm x 15 cm x 300 cm a semelhança foi ainda mais acentuada e novamente as velocidades foram maiores para o transdutor de 54 kHz.

Os Quadros 6 e 7 a seguir sintetizam os resultados obtidos nessa modalidade de ensaio para a espécie *Hymenolobium Petraeum*.

Quadro 6 – Resumo dos ensaios longitudinais B e B' (móvel): *Hymenolobium Petraeum*.

Ensaio longitudinal móvel				
CP	T	Grandeza	B I	B' I
Angelim P. 5x11	200 kHz	V (m/s)	5125,5	5339,4
		CV (%)	3,6%	3,1%
		U (%)	14,1%	14,1%
	54 kHz	V (m/s)	6286,3	6901,4
		CV (%)	2,8%	2,4%
		U (%)	13,0%	13,0%
	30 kHz	V (m/s)	4917,1	5148,2
		CV (%)	27,6%	28,9%
		U (%)	13,0%	13,0%
Angelim P. 7x15	200 kHz	V (m/s)	5738,7	5359,4
		CV (%)	2,8%	4,1%
		U (%)	12,6%	12,6%
	54 kHz	V (m/s)	7119,4	6652,2
		CV (%)	3,4%	5,0%
		U (%)	13,6%	13,6%

Fonte: Acervo próprio.



Quadro 7 – Resumo dos ensaios longitudinais C e C' (móvel): *Hymenolobium Petraeum*.

Ensaio longitudinal móvel								
CP	T	Grandeza	C I	C II	C III	C' I	C' II	C' III
Angelim P. 5x11	200 kHz	V (m/s)	5256,6	5341,1	5412,8	5388,0	5349,2	5324,7
		CV (%)	2,5%	1,8%	2,9%	2,3%	2,8%	4,0%
		U (%)	13,0%	13,0%	13,0%	13,0%	13,0%	13,0%
	54 kHz	V (m/s)	6099,1	6247,7	6328,7	6501,0	6526,9	6405,9
		CV (%)	2,0%	2,6%	3,4%	3,5%	2,7%	2,9%
		U (%)	13,2%	13,2%	13,2%	13,2%	13,2%	13,2%
	30 kHz	V (m/s)	4714,5	4150,3	4448,2	4399,9	4820,2	4878,0
		CV (%)	22,9%	31,0%	31,2%	30,4%	29,9%	29,2%
		U (%)	13,2%	13,2%	13,2%	13,2%	13,2%	13,2%
Angelim P. 7x15	200 kHz	V (m/s)	5763,0	5712,5	5568,4	5842,0	5776,4	5532,7
		CV (%)	3,0%	4,7%	4,9%	3,3%	3,0%	5,2%
		U (%)	13,6%	13,6%	13,6%	13,6%	13,6%	13,6%
	54 kHz	V (m/s)	7084,0	6956,9	6756,5	7071,2	6993,0	6760,3
		CV (%)	2,5%	3,3%	3,9%	2,5%	2,5%	4,6%
		U (%)	13,2%	13,2%	13,2%	13,2%	13,2%	13,2%

Fonte: Acervo próprio.

Para todos os ensaios longitudinais indiretos móveis realizados, os coeficientes de variação das velocidades observados para o Angelim pedra foram inferiores aos observados para o Pinus. Observa-se isso também através dos gráficos apresentados, onde os picos de velocidades observados nos corpos de prova de Pinus são muito mais aparentes. Essas variações localizadas de velocidades podem estar relacionadas à presença de defeitos.

#### 4.4 ENSAIO B-B' / C-C': TRANSVERSAL DIRETO

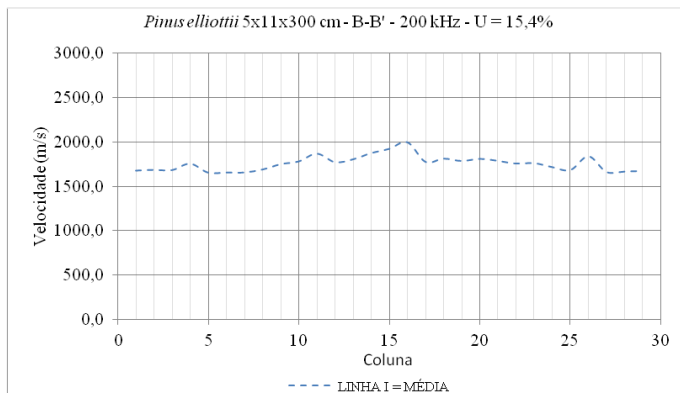
##### 4.4.1 *Pinus elliottii*: 5 cm x 11 cm x 300 cm / 7 cm x 15 cm x 300 cm

As velocidades de propagação do pulso ultrassônico obtidas a partir do ensaio transversal B-B' realizado nos corpos de prova de Pinus representam também as velocidades na direção tangencial ( $V_{TT}$ ).

Para o corpo de prova de 5 cm x 11 cm x 300 cm os resultados obtidos com os três transdutores (200 kHz, 54 kHz e 30 kHz) foram bastante similares. Para o corpo de prova de 7 cm x 15 cm x 300 cm observou-se o mesmo, porém apenas para os transdutores de 200 kHz e 54 kHz (o de 30 kHz não foi utilizado nessa peça). A Figura 30 ilustra os valores obtidos para o transdutor de 200 kHz na menor peça e os

gráficos dos Apêndices A-2 e B-2 ilustram todos os resultados obtidos. Nota-se que houve uma pequena divergência entre os resultados, porém os mesmos tiveram a mesma conformação para cada peça.

Figura 30 – Velocidade transversal direta B-B' - 200 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.



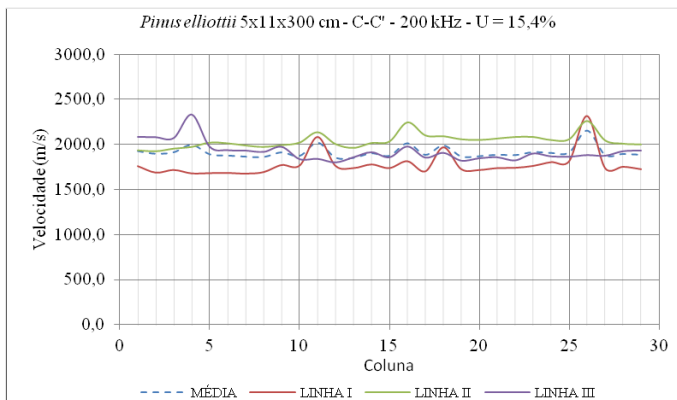
Fonte: Acervo próprio.

Embora nesse ensaio, para o menor corpo de prova, a menor dimensão da face em contato com o transdutor (5,0 cm) ter correspondido ao diâmetro do transdutor de 54 kHz ( $\phi = 5,0$  cm), os resultados das leituras efetuadas aparentemente pouco foram influenciados por esse fator para o referido transdutor (efeito de borda - efeito presente, porém ocultado pela ortotropia e não homogeneidades).

Para o ensaio transversal C-C', foram utilizados os mesmos conjuntos de transdutores e peças do ensaio B-B', porém o ensaio C-C' contemplou três linhas de leituras (I, II e III), pois as faces correspondentes a esse ensaio são maiores que as do anterior. As velocidades obtidas a partir desse ensaio, para a linha II, representam também as velocidades na direção radial ( $V_{RR}$ ) para esses dois corpos de prova.

A Figura 31 ilustra os valores obtidos para o transdutor de 200 kHz na menor peça e os gráficos dos Apêndices A-2 e B-2 ilustram todos os resultados obtidos.

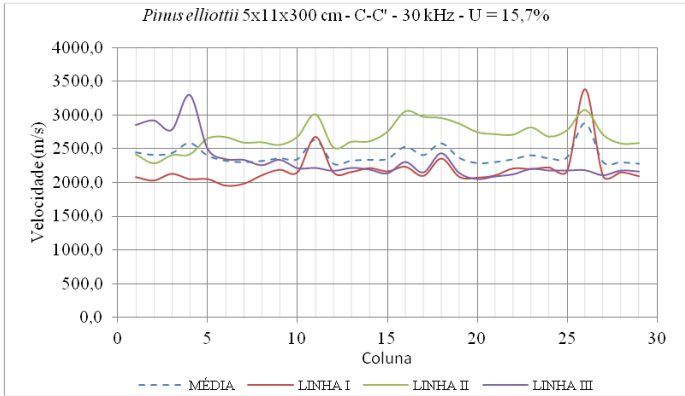
Figura 31 – Velocidade transversal direta C-C' - 200 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.



Fonte: Acervo próprio.

Nota-se para os dois corpos de prova que a maioria das velocidades correspondentes à linha II ( $V_{RR}$ ) é maior que as obtidas a partir das demais linhas de leitura (I e III), as quais são mistas, ou seja, os pulsos de ultrassom atravessam seções mistas (radial/tangencial). Para esse ensaio, os resultados obtidos com o transdutor de 30 kHz no menor corpo de prova diferiram consideravelmente dos demais, como pode ser observado na Figura 32. Embora o gráfico obtido com esse transdutor apresente a mesma conformação que os demais, as velocidades encontradas foram superiores. Acredita-se que essa diferença observada possa ter origem na curta distância entre os transdutores ( $L = 5,0$  cm), especificamente, na relação entre essa distância percorrida pela onda e o comprimento de onda ( $L/\lambda$ ). Dos ensaios C-C' realizados nos corpos de prova de *Pinus elliottii*, somente para esse último descrito (com o transdutor de 30 kHz) essa relação foi inferior a 1,0.

Figura 32 – Velocidade transversal direta C-C’ - 30 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.



Fonte: Acervo próprio.

Para a menor peça, o sensível e gradual aumento observado nas velocidades B-B’ e C-C’ ao longo do comprimento pode ser justificado pelo aumento, também ao longo do comprimento, da densidade de anéis.

O Quadro 8 apresenta os valores médios das velocidades B-B’ e C-C’, o coeficiente de variação (CV) para cada velocidade e o teor de umidade (U) do corpo de prova (CP) no momento do ensaio.

Quadro 8 – Resumo dos ensaios transversais: *Pinus elliottii*.

Ensaio transversal						
CP	T	Grandeza	B-B' I	C-C' I	C-C' II	C-C' III
Pinus 5x11	200 kHz	V (m/s)	1760,4	1778,2	2035,2	1920,3
		CV (%)	4,9%	7,5%	3,8%	5,7%
		U (%)	15,4%	15,4%	15,4%	15,4%
	54 kHz	V (m/s)	1796,3	1880,9	2088,7	2046,8
		CV (%)	6,0%	8,8%	4,0%	4,2%
		U (%)	15,4%	15,7%	15,7%	15,7%
	30 kHz	V (m/s)	1770,5	2190,2	2690,9	2324,4
		CV (%)	5,6%	12,0%	7,4%	12,4%
		U (%)	15,4%	15,7%	15,7%	15,7%
Pinus 7x15	200 kHz	V (m/s)	1786,2	1788,9	2033,6	1814,0
		CV (%)	7,0%	6,9%	4,4%	6,5%
		U (%)	16,3%	16,3%	16,3%	16,3%
	54 kHz	V (m/s)	1849,3	1865,4	2086,5	1931,9
		CV (%)	7,3%	8,1%	6,1%	6,6%
		U (%)	15,1%	15,6%	15,6%	15,6%

Fonte: Acervo próprio.

De acordo com o quadro anterior (Quadro 8), para o ensaio B-B' no menor corpo de prova, as velocidades obtidas pouco divergiram. Como o teor de umidade era o mesmo (15,4%), essa pequena variação pode ser resultado da baixa relação ( $L/\lambda$ ) obtida com os transdutores de 54 kHz e 30 kHz ( $L/\lambda \approx 3,3$  – 54 kHz /  $L/\lambda \approx 1,9$  – 30 kHz). Adicionalmente, para o transdutor de 54 kHz há a hipótese também da influência do efeito de borda. Para o mesmo ensaio, porém no corpo de prova com seção de 7 cm x 15 cm, acredita-se que os motivos das variações das velocidades sejam os mesmos, porém, o fato de o teor de umidade ter sido menor para o ensaio com o transdutor de 54 kHz contribuiu para que essa diferença nas velocidades fosse ainda maior.

Para o ensaio C-C' as observações são praticamente as mesmas, sendo que para o menor corpo de prova, a menor distância entre os transdutores (5,0 cm) possivelmente teve maior influência nos resultados.

Nota-se também que os coeficientes de variação das velocidades observados para as velocidades radiais foram inferiores aos observados para as velocidades tangenciais, exceto nos ensaios com o transdutor de 30 kHz.

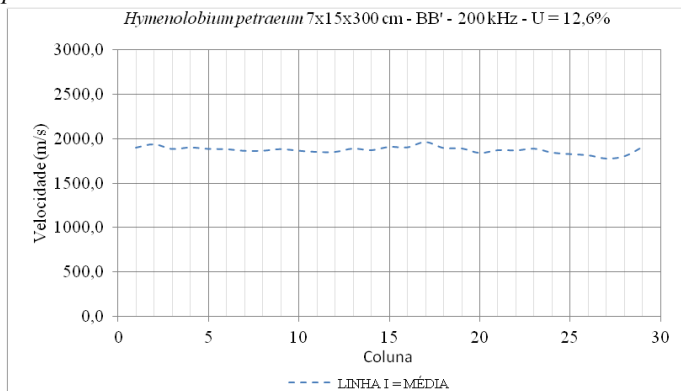
Os picos observados nos gráficos apresentados nessa subseção são resultados de não homogeneidades presentes nos corpos de prova e posteriormente serão analisados.

#### **4.4.2 *Hymenolobium Petraeum*: 5 cm x 11 cm x 300 cm / 7 cm x 15 cm x 300 cm**

Diferentemente dos corpos de prova de Pinus, as velocidades de propagação do pulso ultrassônico correspondentes ao ensaio transversal B-B' realizado nos corpos de prova de Angelim pedra foram obtidas a partir de leituras mistas.

Para o menor corpo de prova, os resultados desse ensaio realizado com os três transdutores apresentaram divergências quanto ao valor absoluto das velocidades, entretanto os gráficos obedeceram ao mesmo padrão. O mesmo se observou no corpo de prova de 7 cm x 15 cm x 300 cm, exceto para o transdutor de 30 kHz que não foi utilizado nessa peça. Os valores das velocidades ultrassônicas obtidos com o transdutor de 200 kHz na peça de 7 cm x 15 cm x 300 cm são ilustrados na Figura 33. Os Apêndices C-2 e D-2 ilustram todos os resultados obtidos nesse ensaio (B-B').

Figura 33 – Velocidade transversal direta B-B' - 200 kHz - *Hymenolobium petraeum* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

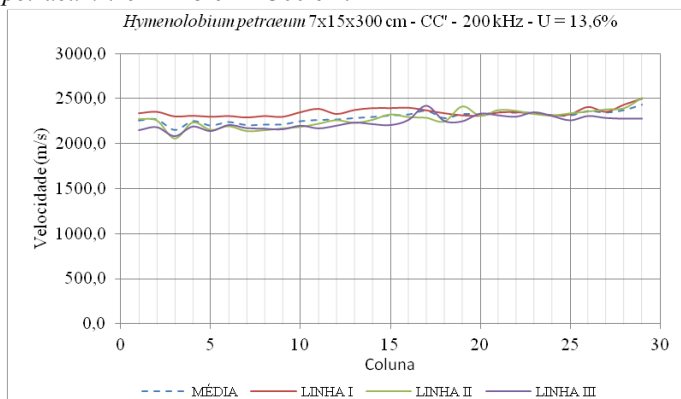


Fonte: Acervo próprio.

No ensaio transversal C-C' foram utilizados os mesmos conjuntos de transdutores e corpos de prova do ensaio B-B'. As velocidades obtidas a partir do ensaio C-C' também corresponderam à leituras mistas.

A Figura 34 ilustra os valores obtidos para o transdutor de 200 kHz na peça de 7 cm x 15 cm x 300 cm e os gráficos dos Apêndices C-2 e D-2 ilustram todos os resultados obtidos para o ensaio C-C'.

Figura 34 – Velocidade transversal direta C-C' - 200 kHz - *Hymenolobium petraeum* 7 cm x 15 cm x 300 cm.



Fonte: Acervo próprio.

Optou-se por apresentar essas duas imagens (Figuras 33 e 34) aqui para mostrar que, a partir da coluna 17, ocorreu uma diminuição gradual da velocidade B-B', concomitantemente com um aumento gradual da velocidade C-C'. Provavelmente essas alterações de velocidades estejam relacionadas com mudanças na inclinação das fibras ao longo do comprimento do corpo de prova de 7 cm x 15 cm x 300 cm (no caso as leituras C-C' estariam se aproximando de leituras radiais – maiores velocidades – e as leituras B-B' de leituras tangenciais – menores velocidades) e não com a densidade de anéis, como observado para o menor corpo de prova de Pinus, situação na qual ambas as velocidades aumentaram.

O Quadro 9 apresenta os valores médios das velocidades B-B' e C-C', o coeficiente de variação (CV) para cada velocidade e o teor de umidade (U) do corpo de prova (CP) no momento do ensaio, para cada transdutor (T).

Quadro 9 – Resumo dos ensaios transversais: *Hymenolobium Petraeum*.

Ensaio transversal						
CP	T	Grandeza	B-B' I	C-C' I	C-C' II	C-C' III
Angelim P. 5x11	200 kHz	V (m/s)	1859,9	1990,2	2001,4	2048,3
		CV (%)	1,6%	2,6%	2,2%	2,8%
		U (%)	14,1%	16,7%	16,7%	16,7%
	54 kHz	V (m/s)	1979,1	1988,0	2005,2	2049,8
		CV (%)	1,2%	2,3%	2,1%	2,9%
		U (%)	13,0%	16,4%	16,4%	16,4%
	30 kHz	V (m/s)	2244,4	2640,5	2686,7	2796,0
		CV (%)	1,8%	3,8%	4,3%	4,6%
		U (%)	13,0%	16,4%	16,4%	16,4%
Angelim P. 7x15	200 kHz	V (m/s)	1873,6	2352,5	2277,4	2235,5
		CV (%)	2,0%	2,0%	4,3%	3,3%
		U (%)	12,6%	13,6%	13,6%	13,6%
	54 kHz	V (m/s)	1874,1	2343,8	2297,6	2244,2
		CV (%)	1,8%	2,3%	4,3%	3,0%
		U (%)	13,2%	13,6%	13,6%	13,6%

Fonte: Acervo próprio.

De acordo com o quadro apresentado (Quadro 9), para o ensaio B-B' no menor corpo de prova, as velocidades médias obtidas com os transdutores de 54 kHz e 30 kHz foram superiores às obtidas com o de 200 kHz. Um dos motivos dessa diferença observada relaciona-se com o diferente teor de umidade no momento do ensaio (diferença de 1,1 %). Outro motivo pode estar relacionado à curta distância entre os

transdutores ( $L/\lambda \approx 3,0 - 54 \text{ kHz}$  /  $L/\lambda \approx 1,5 - 30 \text{ kHz}$ ), bem como o efeito de um possível efeito de borda para o transdutor de 54 kHz. Já para o corpo de prova de 7 cm x 15 cm x 300 cm os resultados do ensaio B-B' para os transdutores de 200 kHz e 54 kHz foram muito semelhantes, bem como os valores de  $L/\lambda$  foram superiores.

Para o ensaio C-C' no menor corpo de prova, os resultados obtidos com os transdutores de 200 kHz e 54 kHz foram praticamente idênticos, já para o transdutor de 30 kHz a relação  $L/\lambda$  novamente foi inferior a 1,0 (como ocorreu para o Pinus, no mesmo ensaio), o que pode ter ocasionado os valores altos de velocidades observados para esse transdutor. Para o corpo de prova de 7 cm x 15 cm x 300 cm observou-se o mesmo.

Para ambos os ensaios e corpos de prova, os coeficientes de variação das velocidades observados para o Angelim pedra foram inferiores aos observados para o Pinus. Isso pode ser justificado pela quantidade e tamanho dos picos observados nos gráficos, que acarretam em variações localizadas de velocidade e que possivelmente estejam relacionados à presença de defeitos, e também pela disposição dos anéis, mais próximos nas peças de Angelim pedra.

#### 4.5 ENSAIO DA INFLUÊNCIA DE UMA FENDA ARTIFICIAL

Os valores de velocidade obtidos a partir das leituras realizadas estão apresentados no Quadro 10 a seguir. No momento do ensaio, a peça de Pinus (7 cm x 15 cm x 300 cm) apresentava teor de umidade de 14,1%.



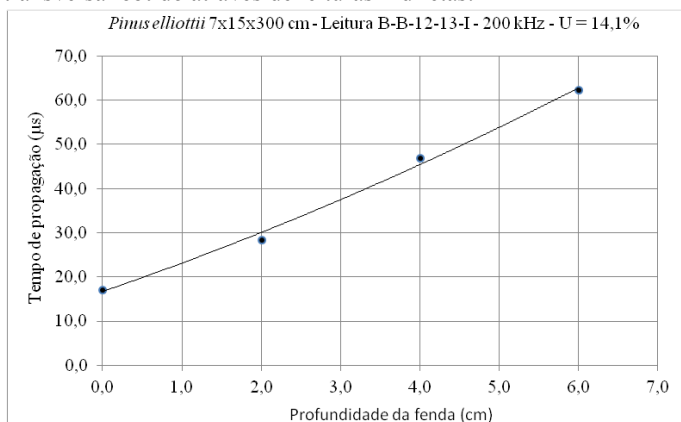
Quadro 10 – Velocidades: ensaio fenda transversal

Leitura		Velocidade (m/s)			
		Etapa 0	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
LONGITUDINAL INDIRETA	B-B-12-13-I	5814,0	<b>3508,8</b> (-39,6%)	<b>2129,9</b> (-63,4%)	<b>1606,4</b> (-72,4%)
	B'-B'-12-13-I	5263,2	5361,9 (1,9%)	5434,8 (3,3%)	5449,6 (3,5%)
	C-C-12-13-I	5899,7	5882,4 (-0,3%)	5571,0 (-5,6%)	<b>3759,4</b> (-36,3%)
	C-C-12-13-II	5649,7	5390,8 (-4,6%)	5221,9 (-7,6%)	5464,5 (-3,3%)
	C-C-12-13-III	5305,0	5249,3 (-1,0%)	5208,3 (-1,8%)	5249,3 (-1,0%)
	C'-C'-12-13-I	5494,5	5494,5 (0,0%)	5263,2 (-4,2%)	<b>3676,5</b> (-33,1%)
	C'-C'-12-13-II	4090,0	4073,3 (-0,4%)	4065,0 (-0,6%)	4090,0 (0,0%)
	C'-C'-12-13-III	5208,3	5194,8 (-0,3%)	5181,3 (-0,5%)	5208,3 (0,0%)
TRANSVERSAL	B-B'-12-12-I	1951,9	1944,3 (-0,4%)	1941,7 (-0,5%)	1944,3 (-0,5%)
	B-B'-13-13-I	1950,6	1948,1 (-0,1%)	1944,3 (-0,3%)	1950,6 (0,0%)
	C-C'-12-12-I	1799,5	1792,6 (-0,4%)	1785,7 (-0,8%)	1827,7 (1,6%)
	C-C'-12-12-II	2089,6	2083,3 (-0,3%)	2071,0 (-0,9%)	2086,4 (-0,1%)
	C-C'-12-12-III	1822,9	1818,2 (-0,3%)	1818,2 (-0,3%)	1792,6 (-1,7%)
	C-C'-13-13-I	1790,3	1785,7 (-0,3%)	1783,4 (-0,4%)	1808,8 (1,0%)
	C-C'-13-13-II	2114,8	2102,1 (-0,6%)	2102,1 (-0,6%)	2102,1 (-0,6%)
	C-C'-13-13-III	1842,1	1811,1 (-1,7%)	1804,1 (-2,1%)	1811,1 (-1,7%)

Fonte: Acervo próprio.

Os valores entre parênteses, ao lado das velocidades das etapas 1, 2 e 3, representam a variação relativa das mesmas em relação à etapa 0. Nota-se assim, que a maioria das velocidades diminuiu sensivelmente, enquanto que as velocidades destacadas diminuíram consideravelmente. O aumento progressivo do tempo de propagação observado nas leituras longitudinais B-B-12-13-I (Figura 35) já era esperado, visto que a fenda foi executada na face B, entre as seções 12 e 13 do corpo de prova, e que a profundidade da fenda foi aumentada em 2,0 cm a cada série de leituras. Já os grandes aumentos dos tempos de propagação do pulso observados nas leituras C-C-12-13-I e C'-C'-12-13-I ocorreram somente na etapa 3 ( $e = 6,0$  cm), pois nessa etapa a extremidade da fenda estava a 6,0 cm da face B, enquanto que a linha I (fixa) dista 3,75 cm da mesma face, para esse corpo de prova.

Figura 35 – Tempo de propagação da onda em função da profundidade da fenda transversal obtido através de leituras indiretas.



Fonte: Acervo próprio.

#### 4.6 ANÁLISE DA DETECÇÃO DE DEFEITOS NATURAIS EM ELEMENTOS DE MADEIRA

Nesta seção, os resultados obtidos com as peças de *Pinus elliottii* serão analisados através de dois métodos distintos, com o intuito de localizar defeitos naturais nesses elementos (nós, especificamente). A opção pela escolha dessa espécie é resultado das análises realizadas nas subseções 4.3 e 4.4, onde se notam que os picos observados nos gráficos para a espécie *Pinus elliottii* destacam-se mais em relação aos observados para a espécie *Hymenolobium petraeum*.

Baseado em uma análise preliminar (comparação dos gráficos com o aspecto visual das peças), notou-se que os dados apresentados na seção 4.4 (leituras transversais diretas) apresentaram melhor correlação com a inspeção visual da peça, se comparados com os dados da seção 4.3 (leituras longitudinais indiretas), especialmente com a presença de dois tipos de defeitos: nó e medula. Foi observado para as leituras transversais que a presença de nós provocou aumento nas velocidades de propagação do pulso ultrassônico. Por essas razões essas leituras foram escolhidas para serem analisadas de forma mais aprofundada, por meio de outras análises.

#### 4.6.1 Análise das leituras adjacentes

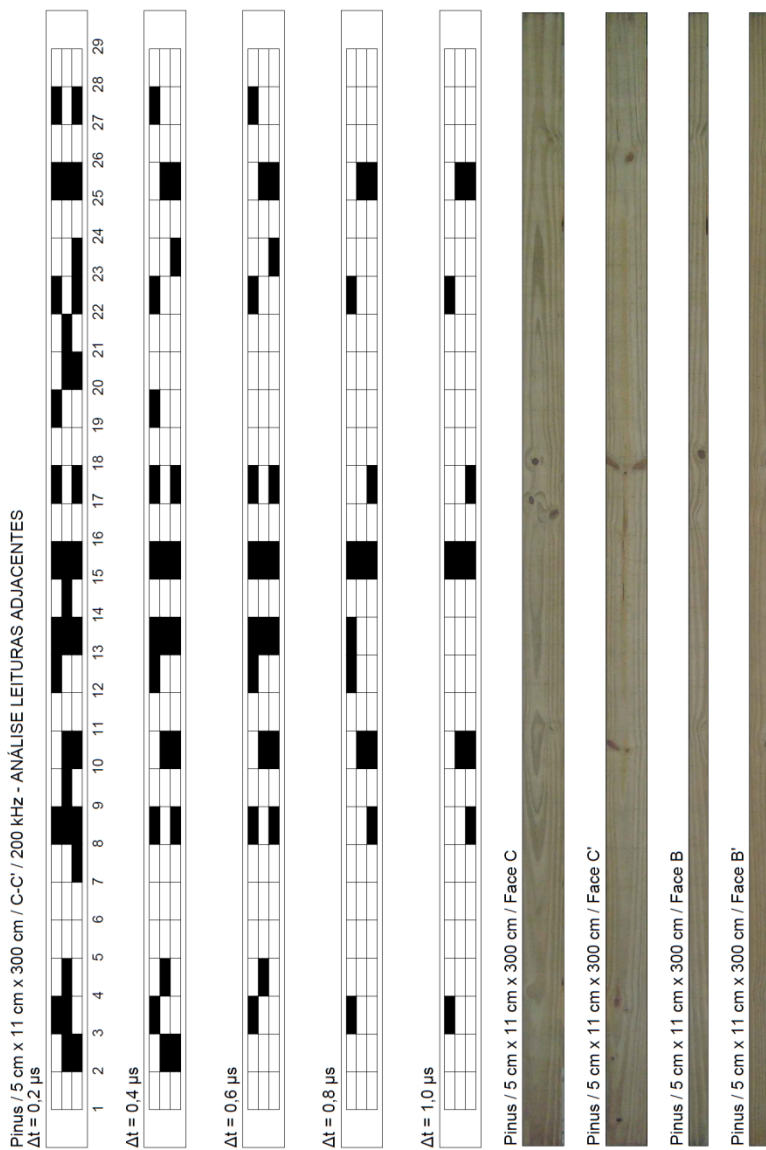
A primeira análise realizada (denominada análise das leituras adjacentes) é muito similar à proposta por McDonald *et al.* (1969). Consiste basicamente na classificação de regiões (áreas) de um elemento em defeituosas e não defeituosas, baseando-se nos resultados obtidos no mapeamento do mesmo elemento por meio de leituras transversais diretas com ultrassom.

O ensaio aqui considerado é o ensaio transversal C-C', pois foi realizado nas faces de maior dimensão dos corpos de prova, em três linhas de leitura, permitindo assim que um número maior de regiões fosse classificado se comparado com o ensaio transversal B-B', realizado em apenas uma linha de leitura.

Cada região classificada foi um retângulo centrado em uma linha de leitura (I, II ou III), localizado entre os pontos de leitura (entre as colunas) da malha apresentada na subseção 3.1.2. A classificação dessas áreas é feita comparando-se dois tempos de propagação adjacentes ao longo de cada linha de leitura. Se a diferença entre esses tempos adjacentes ( $t_i - t_{i+1}$ ), com  $i$  = número da coluna ( $i = 1, 2, \dots, 27, 28$ ), for inferior a um intervalo de tempo pré-determinado ( $\Delta t$ ) a área é classificada como isenta de defeitos. Já se essa diferença for maior ou igual a  $\Delta t$ , a área é classificada como defeituosa. Esse intervalo ( $\Delta t$ ) é uma variável dependente do tipo e das características do defeito, como também das características do ensaio.

Optou-se por analisar esse método utilizando diferentes intervalos de tempo ( $\Delta t$ ) variando de 0,2  $\mu s$  a 1,0  $\mu s$ , com incrementos de 0,2  $\mu s$ . A magnitude adotada para esse intervalo foi baseada em testes preliminares e também nos resultados obtidos por McDonald (1978), embora as condições de ensaio fossem diferentes. As Figuras 36 e 37 exibem os resultados obtidos com esse método para os dois corpos de prova de *Pinus elliottii* utilizando o transdutor de 200 kHz. No apêndice E-1 encontram-se os resultados obtidos com o transdutor de 54 kHz. As áreas hachuradas representam as áreas classificadas como defeituosas conforme a análise descrita. Assim sendo, essa análise separa as regiões que apresentam bruscas mudanças de velocidade das regiões que apresentam mudanças graduais de velocidade.

Figura 36 – Análise das leituras adjacentes C-C' - 200 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.



Fonte: Acervo próprio.

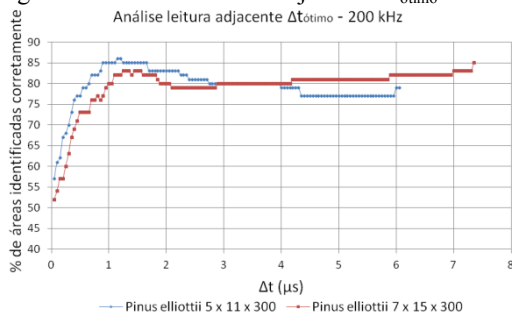


Nota-se, para ambos os corpos de prova e transdutores (de 200 kHz e de 54 kHz), assim como comentado por McDonald (1978), que no centro de defeitos ou no centro de uma região onde há concentração de defeitos (como exemplo, entre as colunas 16 e 17 do menor corpo de prova e entre as colunas 6 e 7 do maior corpo de prova), não ocorrem mudanças abruptas de velocidades, o que resulta na falsa impressão de que essas regiões são sãs. Com o intuito de avaliar o quanto isso influencia nos resultados, procurou-se fazer uma análise mais completa desses resultados. Em função disso, analisou-se mais criteriosamente esse método, na tentativa de avaliar o quanto essa falsa impressão pode afetar os resultados obtidos e também na tentativa de encontrar um intervalo de tempo  $\Delta t_{\text{ótimo}}$  que melhor caracterizasse os corpos de prova.

Para tal, outros intervalos de tempo ( $\Delta t$ ) foram testados, comparando as novas imagens obtidas com uma imagem obtida a partir de um “mapeamento visual” das peças, desenhado a partir da inspeção visual das peças (Apêndice E-1 - Figura 104). Resumidamente, esse “mapeamento visual” foi obtido hachurando-se os retângulos correspondentes às regiões realmente defeituosas (que apresentam nós, constatados pela inspeção visual).

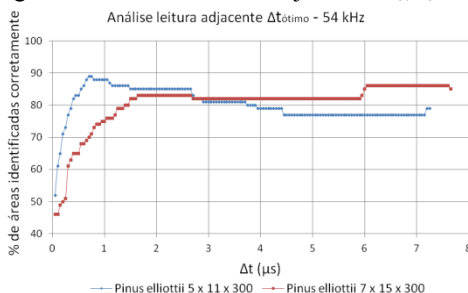
A partir disso, o seguinte critério foi utilizado, para os diversos intervalos de tempo ( $\Delta t$ ) testados: atribuiu-se uma nota em uma escala de 0 a 84 (84 é o total de regiões classificadas com esse método) para cada intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) testado; iniciando do 0, somava-se 1 a cada identificação correta (seja de madeira sã ou com nó) e 0 no caso contrário. Expressou-se essa nota em função da porcentagem de regiões corretamente identificadas. A Figura 38 exibe os resultados obtidos com essa análise para o transdutor de 200 kHz e a Figura 39 para o transdutor de 54 kHz.

Figura 38 – Análise leitura adjacente  $\Delta t_{\text{ótimo}}$  - 200 kHz - *Pinus elliottii*.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 39 – Análise leitura adjacente  $\Delta t_{\text{ótimo}}$  - 54 kHz - *Pinus elliottii*.



Fonte: Acervo próprio.

Para a aplicação dessa análise os valores de  $\Delta t$  testados devem iniciar em um valor muito baixo (aqui no caso  $0,05 \mu s$ ) e serem gradativamente aumentados até que se chegue a um  $\Delta t_{\text{limite}}$  que classifique todas as regiões do corpo de prova como isenta de defeitos. Ou seja, parte-se de um extremo a outro da classificação.

Para o transdutor de 200 kHz, nota-se pela Figura 38, para o corpo de prova de  $5 \text{ cm} \times 11 \text{ cm} \times 300 \text{ cm}$ , que o intervalo de tempo  $\Delta t_{\text{ótimo}} = 1,20 \mu s$  foi o que melhor caracterizou a peça quanto a localização de defeitos, correspondendo a 86% de regiões que foram corretamente localizadas. Já para o corpo de prova de  $7 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 300 \text{ cm}$ , embora a porcentagem de regiões corretamente identificadas ter sido muito parecida (85%), o  $\Delta t$  associado à ela é  $\geq 7,35 \mu s = \Delta t_{\text{limite}}$  que classifica todas as regiões como isenta de defeitos, ou seja, confirma-se aqui a hipótese de que, para defeitos grandes (os defeitos no corpo de prova de  $7 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 300 \text{ cm}$  são maiores que os do menor corpo de prova), esse método da análise adjacente não apresenta bons resultados. Nesse caso, todos os nós foram classificados como regiões sãs de acordo com essa análise efetuada, o que não representa a realidade para esse corpo de prova.

Para o transdutor de 54 kHz o mesmo se observou, sendo que os valores obtidos para o corpo de prova de  $5 \text{ cm} \times 11 \text{ cm} \times 300 \text{ cm}$  corresponderam a um  $\Delta t_{\text{ótimo}} = 0,75 \mu s$  e a 89% de regiões corretamente identificadas. Isso é um indicio de que o transdutor de 54 kHz é mais sensível na detecção/localização de defeitos. Já para o corpo de prova de  $7 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 300 \text{ cm}$  a maior porcentagem de áreas corretamente identificadas (86%) correspondeu a o  $\Delta t_{\text{limite}} = 7,60 \mu s$  e novamente todos

os nós foram classificados como regiões sãs de acordo com essa análise efetuada, não representando a realidade.

Com base nos valores de  $\Delta t_{\text{ótimo}}$  obtidos para ambos os transdutores (200 kHz e 54 kHz) pode-se inferir então que se considerarmos com um menor  $\Delta t$  há a possibilidade de ocorrência de um falso positivo em função da própria variação do equipamento, o que seria um aspecto positivo para o transdutor de 200 kHz, por outro lado, há o risco desse transdutor não captar pequenos defeitos.

#### 4.6.2 Análise das leituras de referência

A segunda análise efetuada também consistiu em classificar regiões da peça em defeituosas e não defeituosas a partir de leituras transversais diretas (leituras obtidas com o ensaio transversal C-C'). Novamente, cada região (área) classificada foi um retângulo centrado em uma linha de leitura (I, II ou III), entretanto localizado na coluna (i, i = 1, 2,..., 28, 29) correspondente a leitura (da malha apresentada na subseção 3.1.2), e não entre os pontos de leitura como na análise da subseção 4.6.1. Isso se deve ao fato de que a classificação utilizada nessa análise foi feita comparando-se cada leitura ( $L_i$ ) com uma leitura de referência ( $L_{\text{ref.}}$ ), sendo que para cada linha ensaiada adotou-se uma leitura de referência.

Essas leituras de referência foram obtidas a partir da análise dos gráficos apresentados na subseção 4.4 e da inspeção visual dos corpos de prova, correspondendo a uma seção isenta de qualquer tipo de defeito. Para a peça de 5 cm x 11 cm x 300 cm as leituras de referência foram as realizadas na coluna 7, e para a peça de 7 cm x 15 cm x 300 cm foram as realizadas na coluna 24. A classificação das áreas foi feita (para cada linha), então, a partir da diferença entre a leitura de referência correspondente e todas as demais ( $L_{\text{ref.}} - L_i$ ). Se essa diferença for inferior a um intervalo de tempo pré-determinado ( $\Delta t$ ), a região correspondente à leitura é classificada como isenta de defeitos. Já se a diferença for maior que um determinado intervalo  $\Delta t$  a área correspondente é classificada como defeituosa.

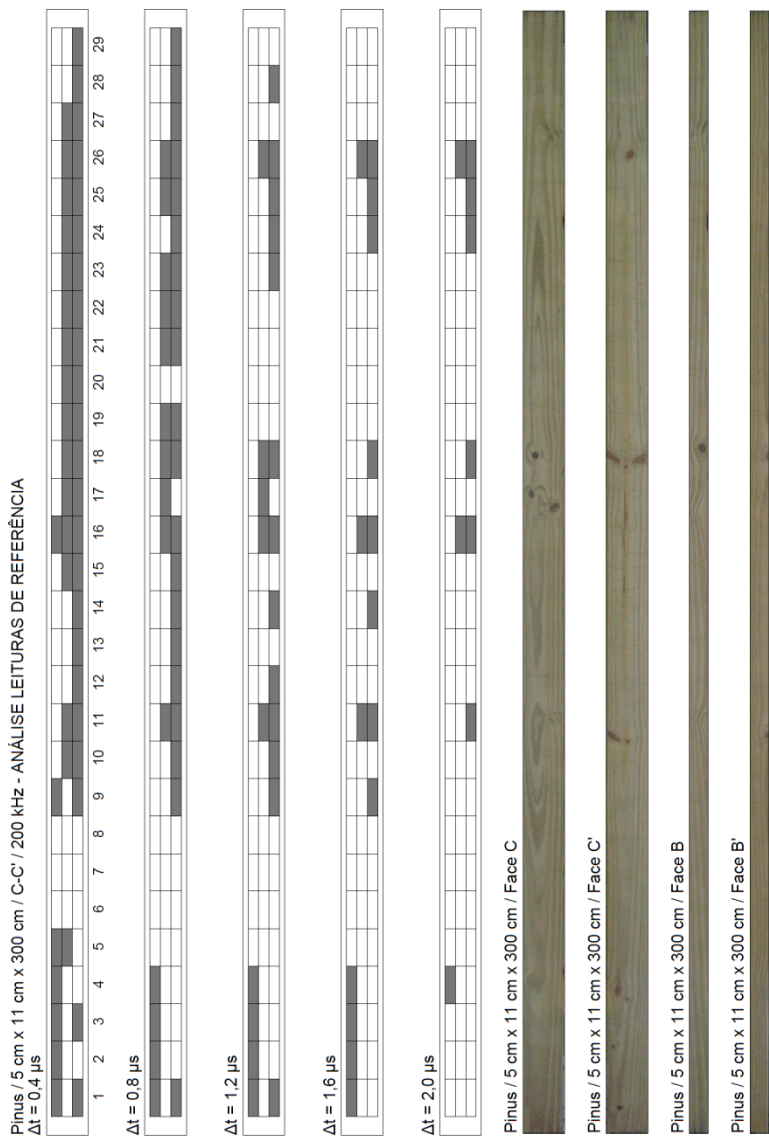
Para a seleção dos valores de  $\Delta t$  a serem analisados, testaram-se preliminarmente os mesmos intervalos de tempo utilizados na subseção 4.6.1. Verificou-se, entretanto, comparando os resultados obtidos (para aqueles intervalos de tempo) com a inspeção visual da peça, que eram necessários valores maiores de  $\Delta t$  para uma localização mais precisa dos defeitos. Após uma série de testes e comparações com o aspecto visual dos corpos de prova, optou-se assim por utilizar valores de  $\Delta t$  variando



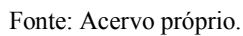
de 0,4  $\mu$ s a 2,0  $\mu$ s, com incrementos de 0,4  $\mu$ s, pois se acredita que dentro dessa faixa há um valor de  $\Delta t$  que melhor indique a posição dos defeitos (com maior precisão).

As Figuras 40 e 41 exibem os resultados obtidos com esse método para as duas peças de *Pinus elliottii* utilizando o transdutor de 200 kHz. No apêndice E-2 encontram-se os resultados obtidos com o transdutor de 54 kHz. As áreas hachuradas representam as áreas classificadas como defeituosas conforme a análise descrita.

Figura 40 – Análise das leituras de referência C-C' - 200 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.



Fonte: Acervo próprio.



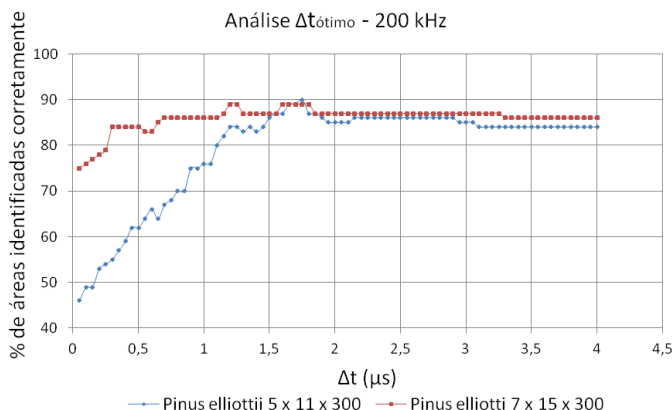
Nota-se que diferentemente do observado na análise anterior (subseção 4.6.1), para ambos os corpos de provas e transdutores, que no centro de defeitos não aparecem falsas impressões de que essas regiões são sãs, pois as diferenças de tempo de propagação de uma região são em relação a essas regiões as classificaram como defeituosas.

Em função disso e da aparente melhor classificação obtida com esse método da leitura de referência em comparação com o método das leituras adjacentes (a partir de observações visuais das peças e das imagens resultantes dessa análise), analisou-se esse método da mesma maneira que o método das leituras adjacentes (subseção 4.6.1), na tentativa de encontrar um intervalo de tempo  $\Delta t_{\text{ótimo}}$  que melhor representasse a realidade das peças (que estivesse associado a maiores porcentagens de áreas corretamente identificadas).

Para isso, ajustou-se o “mapeamento visual” da subseção 4.6.1 ao arranjo de áreas desse método da leitura de referência (lembrando que as áreas classificadas no método das leituras adjacentes eram as áreas entre os pontos de leitura e, no método da leitura de referência são regiões centradas nos pontos de leitura). Manteve-se o mesmo número de regiões hachuradas (para o mapeamento visual a ser usado como comparação na análise da leitura de referência, exibido no Apêndice E-2 - Figura 107), sendo que na análise de referência o total de regiões a serem classificadas é 87, três a mais que no método anterior.

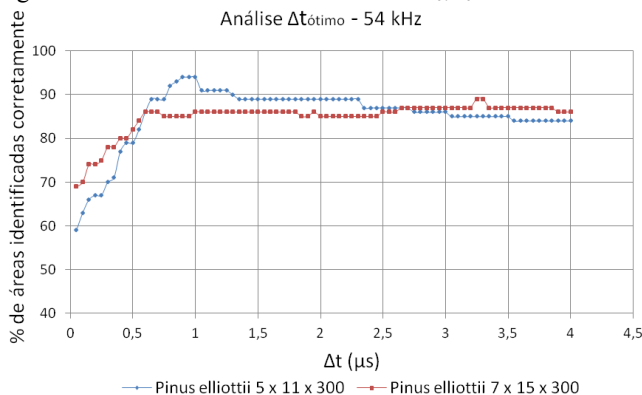
A Figura 42 exibe os resultados obtidos com essa análise para o transdutor de 200 kHz e a Figura 43 para o transdutor de 54 kHz.

Figura 42 – Análise leitura de referência  $\Delta t_{\text{ótimo}}$  - 200 kHz - *Pinus elliottii*.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 43 – Análise leitura de referência  $\Delta t_{\text{ótimo}}$  - 54 kHz - *Pinus elliottii*.



Fonte: Acervo próprio.

Valem aqui as mesmas observações realizadas na subseção 4.6.1 quanto à magnitude dos valores de  $\Delta t$  a serem testados.

Para o transdutor de 200 kHz foi observado para o corpo de prova de 5 cm x 11 cm x 300 cm, que o intervalo de tempo  $\Delta t_{\text{ótimo}} = 1,75$  foi que melhor caracterizou a localização de defeitos, valor correspondente a 90% de regiões que foram corretamente localizadas. Já para o corpo de prova de 7 cm x 15 cm x 300 cm esse intervalo de tempo  $\Delta t$  que melhor caracterizou a peça correspondeu a duas faixas de tempos: uma entre 1,20  $\mu s$  e 1,25  $\mu s$  e outra entre 1,60  $\mu s$  e 1,80  $\mu s$ . Essas duas faixas distintas corresponderam a % de área corretamente identificada igual a 89% e possivelmente são resultado da menor proporção de ensaios realizados no maior corpo de prova em relação ao menor (as faces ensaiadas para o menor corpo de prova possuíam 11 cm x 300 cm e para o maior 15 cm x 300 cm, enquanto que a malha adotada contemplou a mesma quantidade de leituras - malha mais grosseira no maior corpo de prova). Diferentemente do método anterior (das análises adjacentes), com o método das leituras de referência obteve-se resultados muito mais realistas para o maior corpo de prova.

Para o transdutor de 54 kHz, para o corpo de prova de 5 cm x 11 cm x 300 cm, a faixa de intervalo de tempo  $\Delta t_{\text{ótimo}}$  compreendida entre 0,90 e 1,00  $\mu s$  foi a que melhor caracterizou a peça (94% das áreas foram corretamente identificadas). No maior corpo de prova, a faixa de intervalo de tempo que melhor caracterizou a peça quanto a presença de nós compreendeu o intervalo entre 3,25 e 3,30  $\mu s$  (89% das áreas foram corretamente identificadas). O fato de ter uma faixa e não um  $\Delta t$

particular que melhor caracterize esse corpo de prova dá a entender que o tamanho dos defeitos influencia na obtenção do  $\Delta t_{\text{ótimo}}$ .

## 5 CONCLUSÕES

Com base nas análises dos resultados obtidos com leituras ultrassônicas em elementos de madeira no decorrer dessa pesquisa, pode-se concluir:

- As velocidades ultrassônicas obtidas no ensaio longitudinal direto para os corpos de prova de Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*) foram superiores às obtidas nos corpos de prova de Pinus (*Pinus elliottii*). Embora apenas dois corpos de prova terem sido testados para cada espécie, pode-se inferir que os motivos dessa diferença observada estão relacionados à diferença de densidade entre as espécies (Angelim pedra -  $620 \text{ kg/m}^3$  / Pinus -  $400 \text{ kg/m}^3$ ), à presença de nós (maior nos corpos de prova de Pinus) e à diferente constituição do lenho entre elas.

- Quanto ao ensaio longitudinal indireto, mantendo-se um dos transdutores fixo, para o caso do transdutor de 200 kHz não foram observados trechos com velocidades constantes, diferente do observado para o transdutor de 54 kHz. Entretanto, acredita-se esse ensaio necessita de uma análise muito mais profunda para que se possa concluir algo que explique esse comportamento observado com maior exatidão.

- Foi observado para as leituras longitudinais indiretas (independente se com um transdutor fixo ou não) que a presença de nós entre os pontos de leitura provocou aumento no tempo de propagação do pulso ultrassônico, enquanto que para as leituras transversais diretas a presença de nós provocou redução no tempo de propagação do pulso ultrassônico.

- Quanto à direção de propagação da onda, para todos os corpos de prova foi constatado que as maiores velocidades foram obtidas na direção longitudinal, se comparadas às velocidades transversais. Especificamente, para ambos os corpos de prova de *Pinus elliottii*, a média das velocidades obtidas na direção radial foi superior a obtida na direção tangencial ( $V_{RR}/V_{TT} = 1,16$  para o menor corpo de prova e  $V_{RR}/V_{TT} = 1,13$  para o maior - com o transdutor de 200 kHz).

- Quanto à localização de defeitos (nós, especificamente) em elementos de madeira (nos corpos de prova de *Pinus elliottii*), dois métodos distintos foram testados experimentalmente para avaliar a

sensibilidade do ultrassom na classificação de regiões desses elementos quanto à presença de nós. Os resultados obtidos para os dois métodos foram testados por meio de uma análise que indicou que o método da análise das leituras de referência apresentou melhores resultados em relação ao método da análise das leituras adjacentes para os dois corpos de prova de *Pinus elliottii* quanto à comparação visual. Conclui-se que, no geral, para ambos os métodos avaliados, os resultados obtidos com o transdutor de 54 kHz mostraram-se mais satisfatórios.

Sugere-se para trabalhos futuros, a repetição dos tipos de ensaios realizados nessa pesquisa, porém com uma malha mais refinada para o maior corpo de prova. Sugere-se adotar também distâncias maiores que 10 cm para as leituras longitudinais indiretas em função dos resultados pouco conclusivos obtidos nessa pesquisa para essa configuração.

Sugere-se também um estudo aprofundado dos fatores que influenciam a propagação de ondas ultrassônicas na madeira, a utilização de outros métodos (uso de *softwares*) para a análise dos resultados obtidos (não somente nessa pesquisa) e o aprimoramento do uso de leituras indiretas de ultrassom na detecção de defeitos, visto que as mesmas necessitam acesso à somente uma face do elemento a ser inspecionado (aplicação prática).



## REFERÊNCIAS

ARNO, John et al. **The art of woodworking**: Encyclopedia of wood. Alexandria, U.S.: Time-life Books, 1993. 147 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: 1997**. Projeto de estruturas de madeira, Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 19-28, 2005.

BARTHOLOMEU, A. **Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra-som**. 2001. 105 f. Tese (Doutorado em Tecnologia da Madeira) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas, 2001.

BODIG, Jozsef; JAYNE, Benjamin A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York, U.S.: Krieger Publishing, 1993. 712 p.

BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel. Disponível em: <<http://bracelpa.org.br/bra2/?q=node/137>>. Acesso em: 15 fev. 2014.

BRANCO, Jorge Manuel Gonçalves. **Comportamento das ligações tipo cavilha em estruturas mistas madeira-betão**. 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2003.

BROWN, H. P.; PANSHIN, A. J.; FORSAITH, C. C. **Textbook of wood technology**. New York, U.S.: McGraw-Hill, 1949. 695 p.

BUCUR, V. **Acoustics of wood**. Germany: Springer-Verlag, 2006. 403 p.

BURGER, L. M. e RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 157 p.

CALEGARI, L. *et al.* Avaliação de alguns fatores influentes na velocidade ultra-sônica na madeira. **FLORESTA**, Curitiba, v. 38, n. 4, p. 607-615, 2008.

CALIL JÚNIOR, Carlito; OKIMOTO, F. S.; PFISTER, G. M. **Manual de classificação visual**. Convênio Racional Engenharia S/A e IBRAMEM, [s.d]. 15 p.

CARRASCO, E. V. M.; AZEVEDO JÚNIOR, A. P. Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som - fundamentos físicos e resultados experimentais. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 2, p.178-191, 2003.

COELHO, M. C. B.; FINGER, C. A. G. Crescimento em altura para *Pinus elliottii* Engelm originado por diferentes métodos de regeneração em Canela, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p.139-155, nov. 1997.

DEMAUS, R. **Non-destructive investigations**. Disponível em: <<http://www.buildingconservation.com/articles/nondestr/nondestr.htm>>. Acesso em: 28 fev. 2014.

EMERSON, R. N. *et al.* Nondestructive evaluation techniques for timber bridges. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 5., 1998, Montreux. **Proceedings...** Montreux, Switzerland: PPUR, 1998. p. 670 - 677.

EMERSON, R. N. *et al.* Ultrasonic inspection of a glued laminated timber fabricated with defects. In: ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 90., 2001, Washington. **Proceedings...** Washington, U.S., 2001. p. 1 - 19.

FEIO, A. O.; LOURENÇO, P. B. Possibilidades e aplicações de ensaios não destrutivos. In: ENCONTRO SOBRE A MADEIRA E SUAS APLICAÇÕES NOBRES "BEM UTILIZAR A MADEIRA", 1., 2005, Lisboa. **Anais...** Lisboa, Portugal: ISISE, 2005. 23 p.

FERRARI, V. J.; PADARATZ, I. J. Aplicação de ondas ultra-sônicas na detecção das primeiras fissuras em vigas de concreto armado e na avaliação da resistência à compressão. **Acta Scientiarum: Technology**, Maringá, v. 25, n. 2, p.185-191, 2003.

FOULGER, A. N. **Classroom demonstrations of wood properties**. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1969. 42 p.

FULLER, J. J.; ROSS, R. J.; DRAMM, J. R. **Honeycomb and surface check detection using ultrasonic nondestructive evaluation**. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994. 6 p.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. Rio de Janeiro: Ltc, 2009. 295 p. v.2.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Madeira: Uso sustentável na construção civil**. São Paulo, 2009, 103p.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo, Volume I, 1986. 342 p.

MADY, Francisco Tarcísio Moraes. **Conhecendo a madeira: informações sobre 90 espécies comerciais**. Manaus: SEBRAE, 2000. 212 p.

MALAN, F. S. Eucalyptus improvement for lumber production. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995, São Paulo. **Anais...** Piracicaba: IDEF/IPT, 1995. p. 1 - 19.

McDONALD, K. A. **Lumber defect detection by ultrasonics**. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1978. 23 p.

McDONALD, K. A.; COX, R. G.; BULGRIN, E. H. **Locating lumber defects by ultrasonics**. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1969. 14 p.

NDT - Resource Center. **Attenuation of Sound Waves**. Disponível em: <<http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/attenuation.htm>>. Acesso em: 12 abr. 2014.

NESVIJISKI, E. G. **On Design of Ultrasonic Transducers and Accuracy of Velocity Measurements**. Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/v05n02/nesvi/nesvi.htm>>. Acesso em: 22 fev. 2014.

OLIVEIRA, F. G. R. *et al.* Moisture content effect on ultrasonic velocity in *Goupia glabra*. **Materials Research**, São Carlos, v. 8, n. 1, p. 11-14, 2005.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 18, p. 2443-2446, 2006.

PAIT III, John A.; FLINCHUM, D. Mitchell; LANTZ, Clark W. Species Variation, Allocation, and Tree Improvement. In: DURYEA, Mary L.; DOUGHERTY, Phillip M. (Ed.). **Forest Regeneration Manual**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991. p. 207-231. (36).

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 241 p.

PUCCINI, C.T. **Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando o ultra-som**. 2002. 72 f. Tese (Doutorado em Construções Rurais e Ambiente) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas, 2002.

ROSS, Robert J.; PELLERIN, Roy F. **Nondestructive testing for assessing wood members in structures**: A review. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994. 40 p.

SEARS, F. W. *et al.* **Física II**: termodinâmica e ondas. São Paulo: Pearson, 2008. 329 p.

SNIF – Sistema Nacional de Informações Florestais. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/conhecendo-sobre-florestas>>. Acesso em: 05 fev. 2014.

STALNAKER, Judith J.; HARRIS, Ernest C. **Structural design in wood**. New York, U.S.: International Thomson Publishing, 1997. 448 p.

TEIXEIRA, A. R. **Metodologia para determinação da integridade da madeira de edificações históricas por meio de pulsos ultra-sônicos.** 2009. 126 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

TELES, Carlos Dion de Melo. **Estruturas de madeira:** proposta de metodologia de inspeção e correlação da velocidade ultra-sônica com o dano por cupins. 2002. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

TORRES, João Tiago Caridade. **Sistemas construtivos modernos em madeira.** 2010. 166 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.

ZOMBORI, B. **"In situ" Nondestructive Testing of Built in Wooden Members.** Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/v06n03/skatter/skatter.htm>>. Acesso em: 28 fev. 2014.



**APÊNDICE A – Medidas de ultrassom: *Pinus e.* 5x11x300**  
**APÊNDICE A-1 – Velocidades longitudinais indiretas (móveis)**

Figura 44 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 200 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

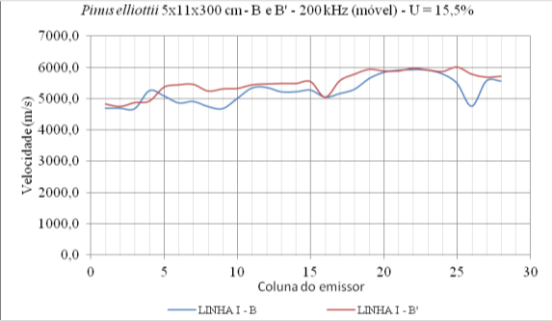


Figura 45 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 54 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

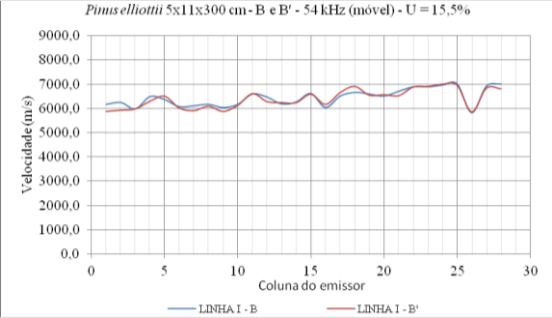


Figura 46 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 30 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

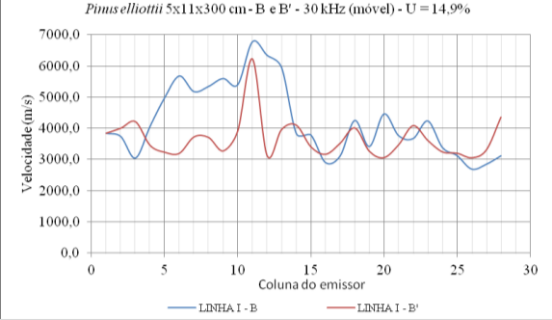


Figura 47 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 200 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

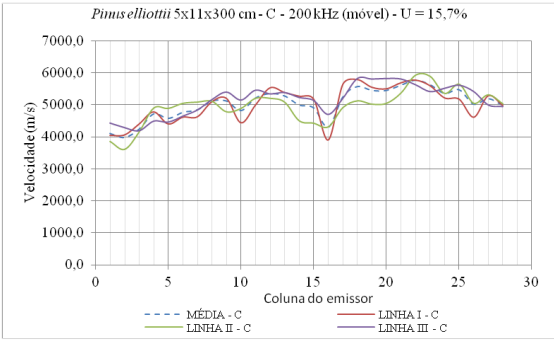


Figura 48 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 54 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

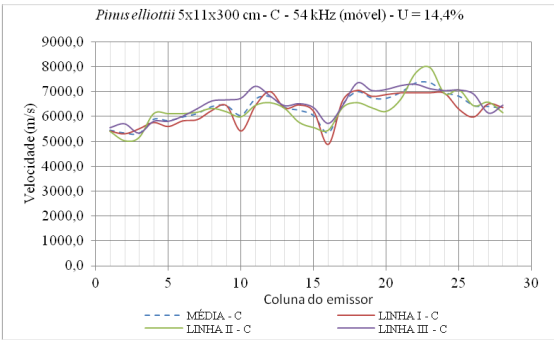


Figura 49 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 30 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

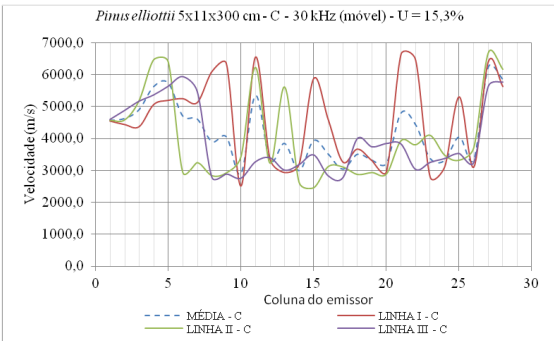




Figura 50 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C’ - 200 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

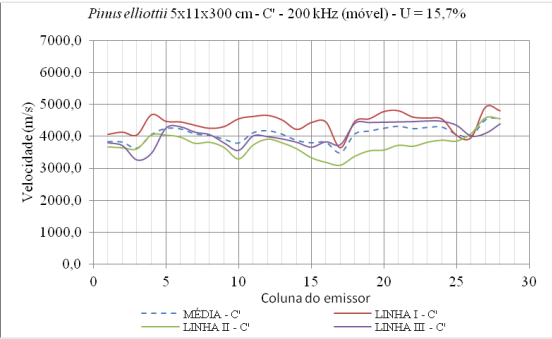


Figura 51 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C’ - 54 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

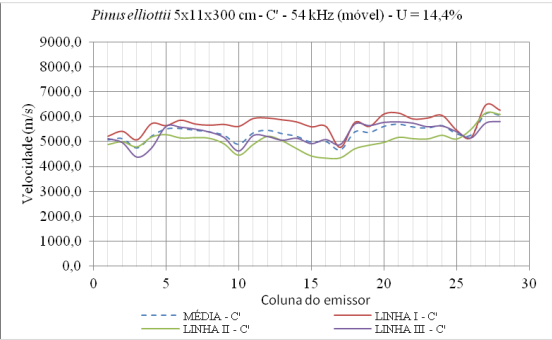
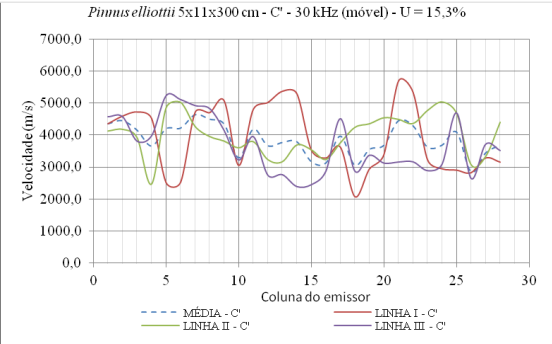


Figura 52 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C’ - 30 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.



APÊNDICE A-2 – Velocidades transversais diretas

Figura 53 – Velocidade transversal direta B-B' - 200 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

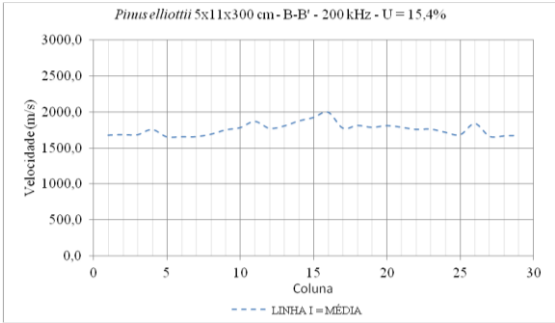


Figura 54 – Velocidade transversal direta B-B' - 54 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

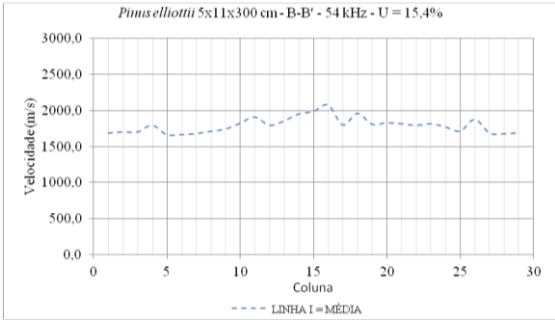


Figura 55 – Velocidade transversal direta B-B' - 30 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

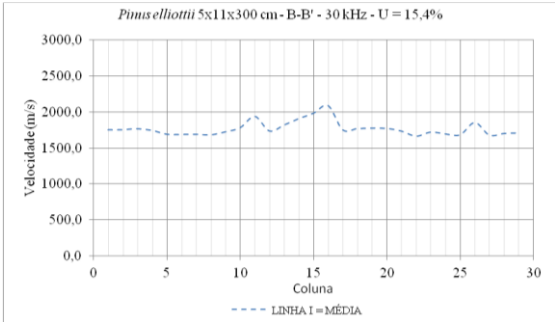


Figura 56 – Velocidade transversal direta C-C' - 200 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

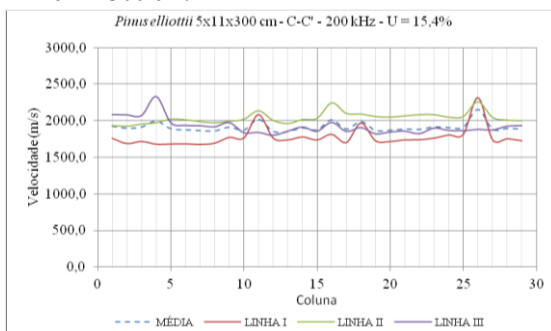


Figura 57 – Velocidade transversal direta C-C' - 54 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

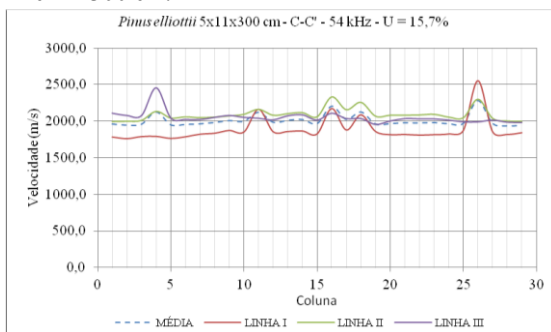
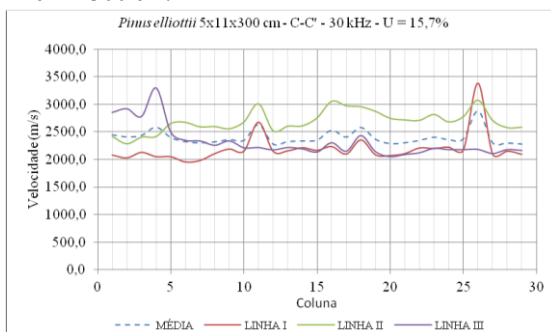


Figura 58 – Velocidade transversal direta C-C' - 30 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.



**APÊNDICE A-3 – Velocidades longitudinais indiretas (fixo)**

Figura 59 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) B e B' - 200 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

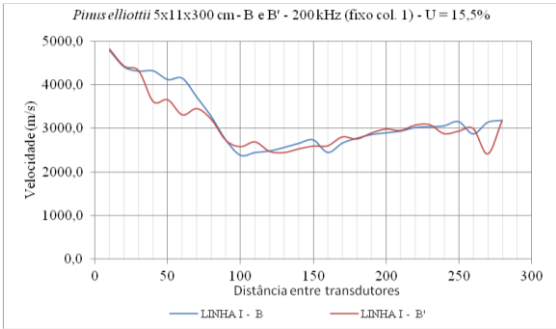


Figura 60 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) B e B' - 54 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

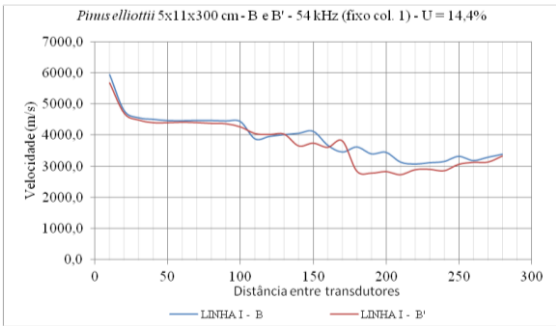


Figura 61 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) C e C' - 200 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

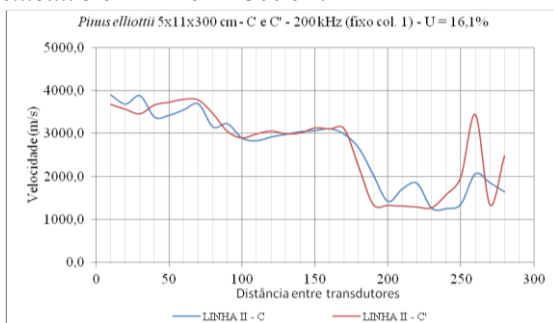
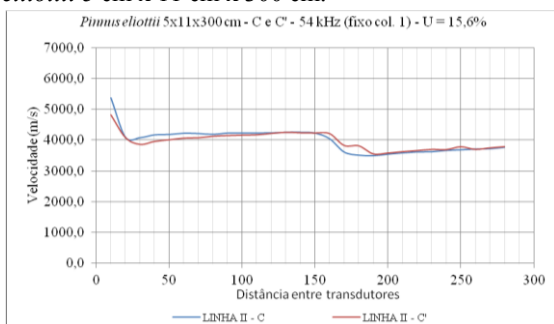


Figura 62 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) C e C' - 54 kHz - *Pinus elliottii* 5 cm x 11 cm x 300 cm.



**APÊNDICE B – Medidas de ultrassom: *Pinus e.* 7x15x300**  
**APÊNDICE B-1 – Velocidades longitudinais indiretas (móveis)**

Figura 63 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 200 kHz - *Pinus elliottii* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

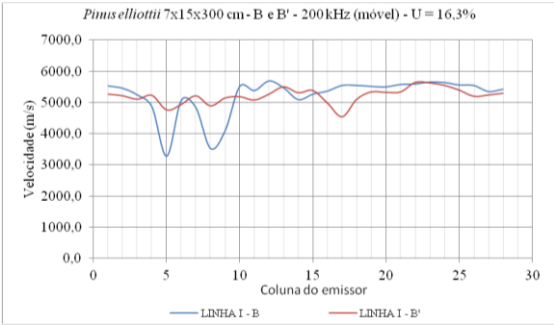


Figura 64 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 54 kHz - *Pinus elliottii* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

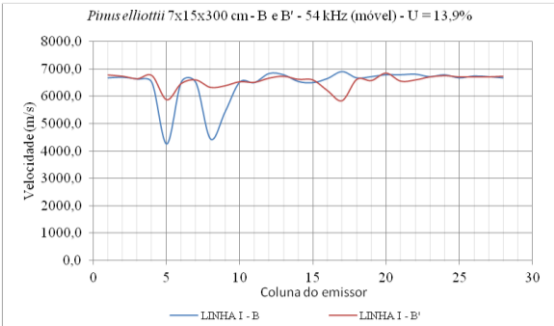


Figura 65 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 200 kHz - *Pinus elliottii* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

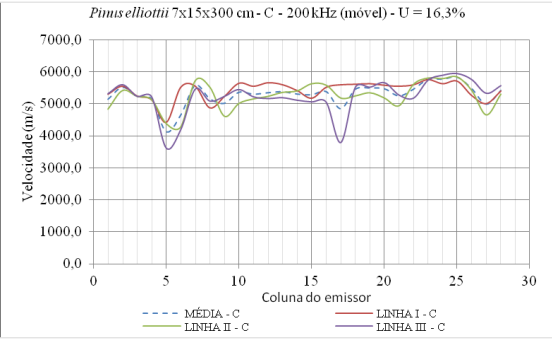


Figura 66 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 54 kHz - *Pinus elliottii* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

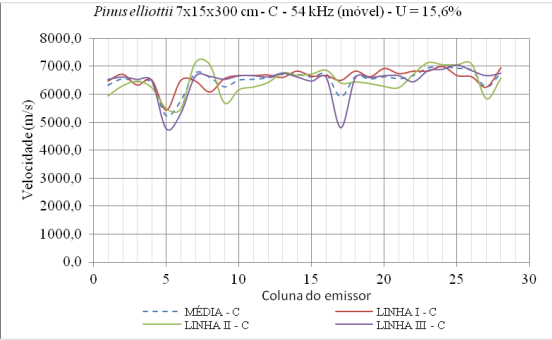


Figura 67 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C’ - 200 kHz - *Pinus elliottii* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

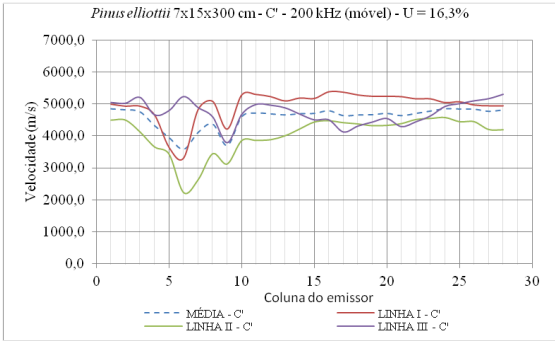
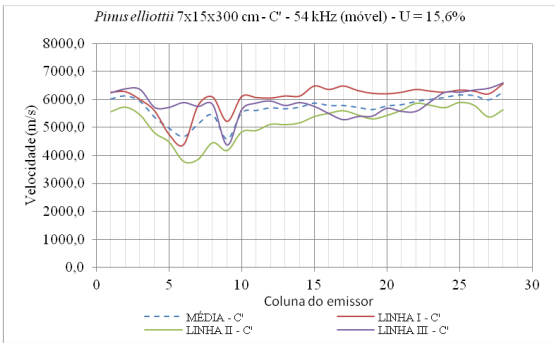


Figura 68 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C’ - 54 kHz - *Pinus elliottii* 7 cm x 15 cm x 300 cm.





APÊNDICE B-2 – Velocidades transversais diretas

Figura 69 – Velocidade transversal direta B-B’ - 200 kHz - *Pinus elliottii* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

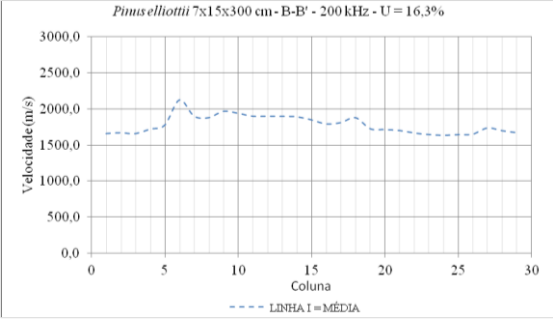


Figura 70 – Velocidade transversal direta B-B’ - 54 kHz - *Pinus elliottii* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

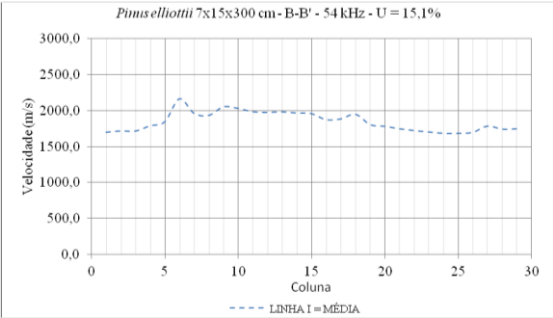


Figura 71 – Velocidade transversal direta C-C’ - 200 kHz - *Pinus elliottii* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

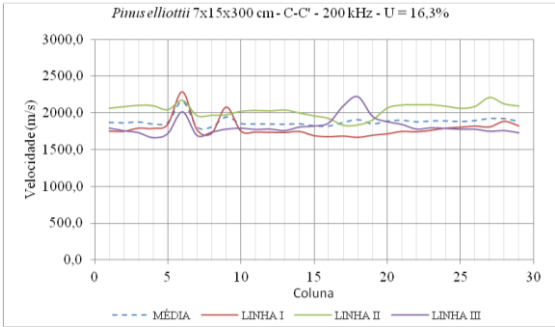
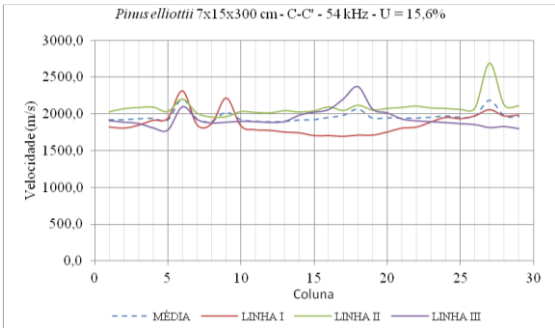


Figura 72 – Velocidade transversal direta C-C’ - 54 kHz - *Pinus elliottii* 7 cm x 15 cm x 300 cm.



**APÊNDICE C – Medidas de ultrassom: *Hymenolobium p.* 5x11x300**  
**APÊNDICE C-1 – Velocidades longitudinais indiretas (móveis)**

Figura 73 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 200 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

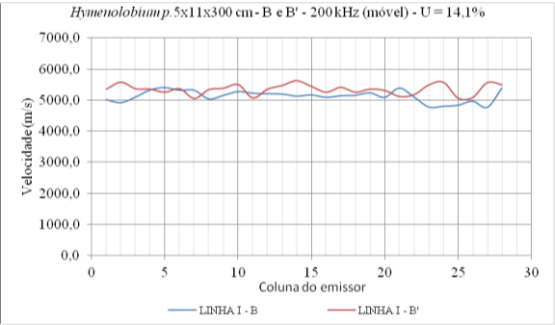


Figura 74 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 54 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

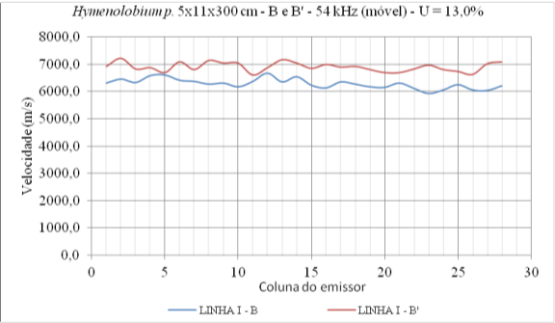


Figura 75 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 30 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

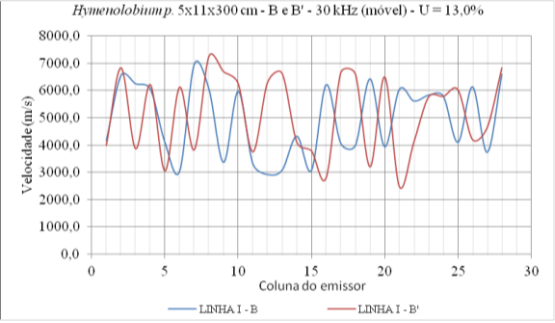


Figura 76 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 200 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

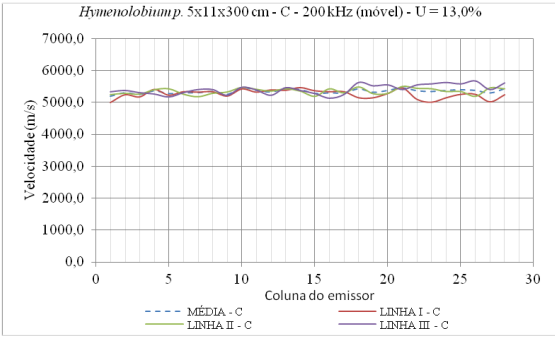


Figura 77 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 54 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

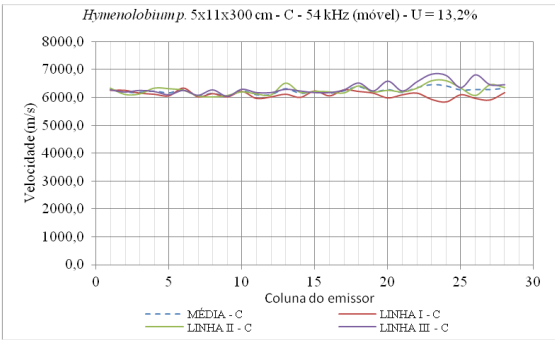


Figura 78 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 30 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

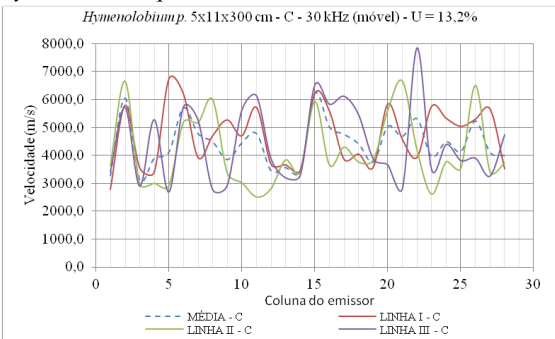


Figura 79 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C’ - 200 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

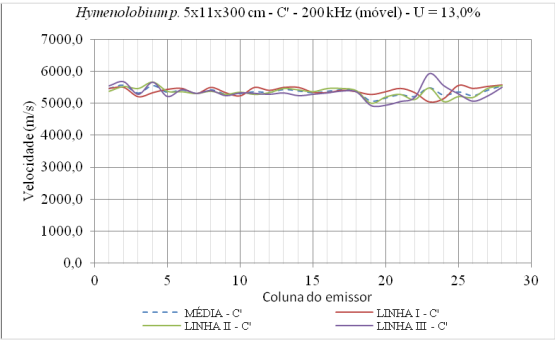


Figura 80 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C’ - 54 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

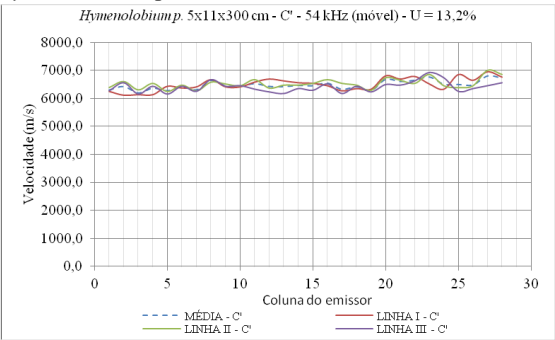
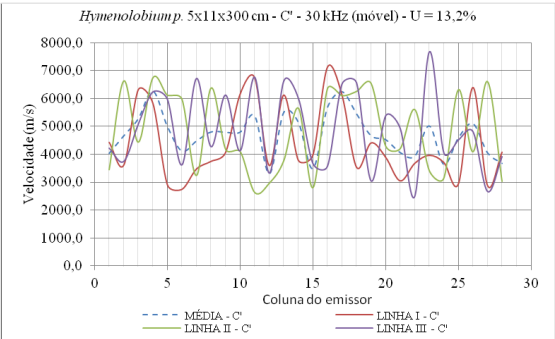


Figura 81 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C’ - 30 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.



**APÊNDICE C-2 – Velocidades transversais diretas**

Figura 82 – Velocidade transversal direta B-B' - 200 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

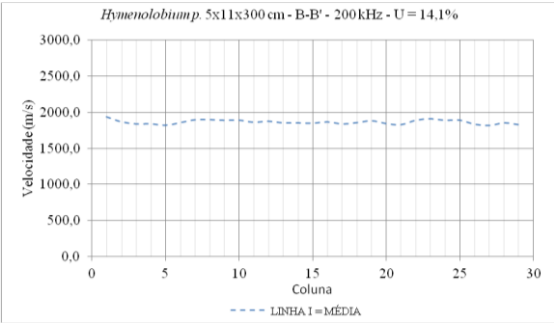


Figura 83 – Velocidade transversal direta B-B' - 54 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

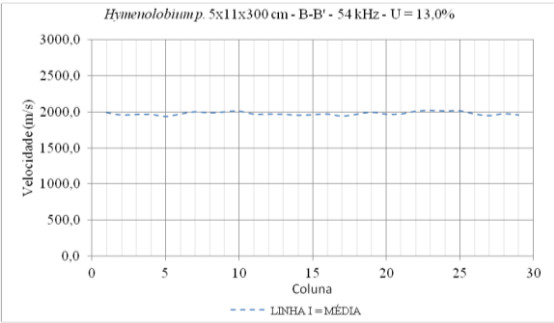


Figura 84 – Velocidade transversal direta B-B' - 30 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

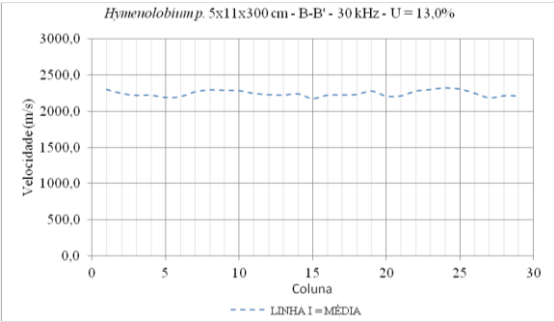


Figura 85 – Velocidade transversal direta C-C’ - 200 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

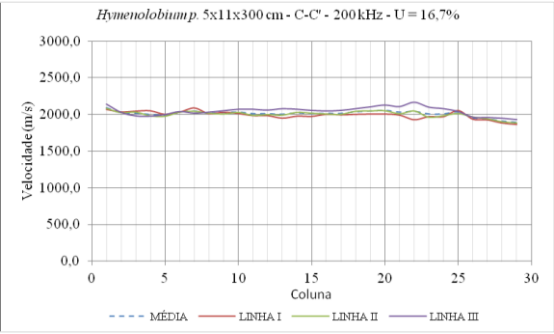


Figura 86 – Velocidade transversal direta C-C’ - 54 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

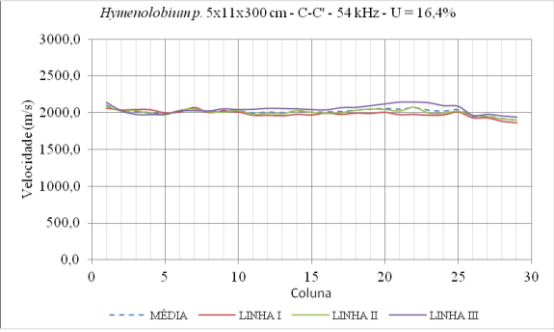
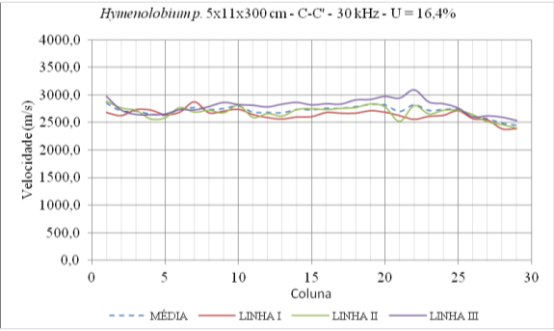


Figura 87 – Velocidade transversal direta C-C’ - 30 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.



APÊNDICE C-3 – Velocidades longitudinais indiretas (fixo)

Figura 88 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) B e B' - 200 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

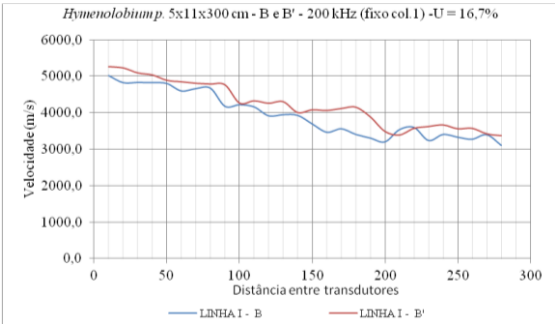


Figura 89 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) B e B' - 54 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

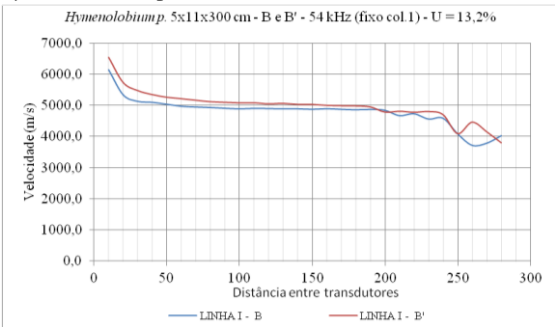




Figura 90 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) C e C' - 200 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.

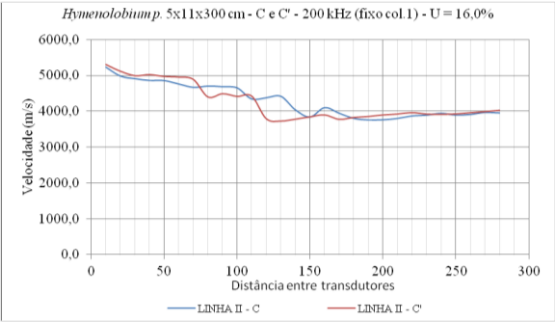
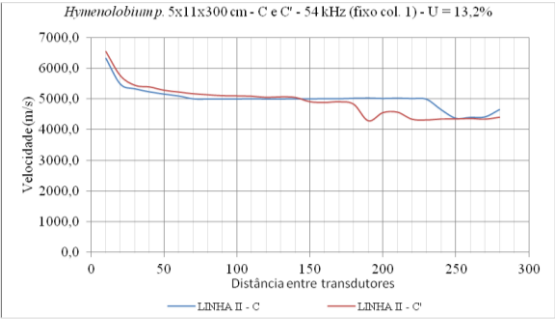


Figura 91 – Velocidade longitudinal indireta (fixo) C e C' - 54 kHz - *Hymenolobium petraeum* 5 cm x 11 cm x 300 cm.



**APÊNDICE D – Medidas de ultrassom: *Hymenolobium p. 7x15x300***  
**APÊNDICE D-1 – Velocidades longitudinais indiretas (móveis)**

Figura 92 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 200 kHz - *Hymenolobium petraeum* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

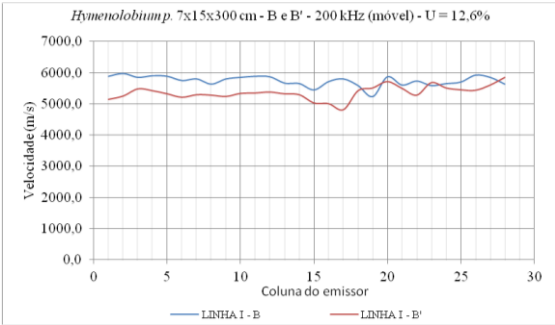


Figura 93 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) B e B' - 54 kHz - *Hymenolobium petraeum* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

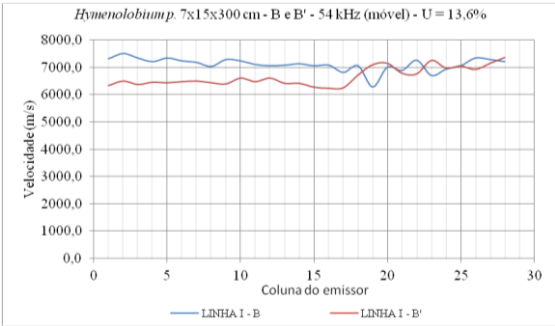


Figura 94 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 200 kHz - *Hymenolobium petraeum* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

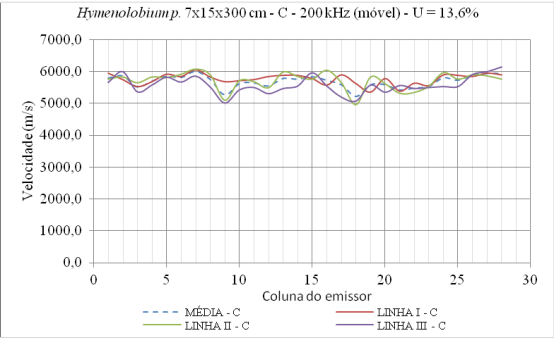


Figura 95 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C - 54 kHz - *Hymenolobium petraeum* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

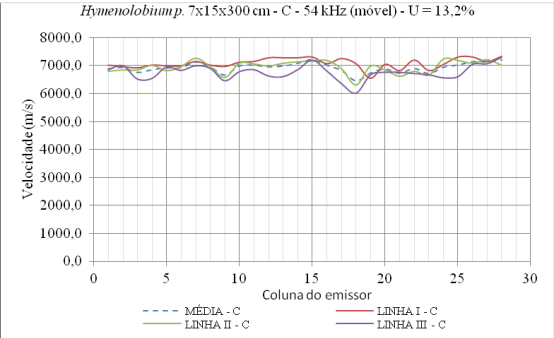


Figura 96 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C' - 200 kHz - *Hymenolobium petraeum* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

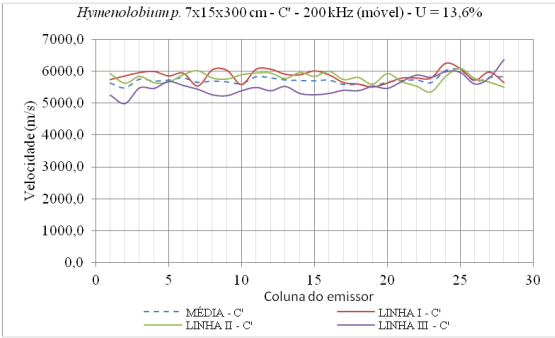
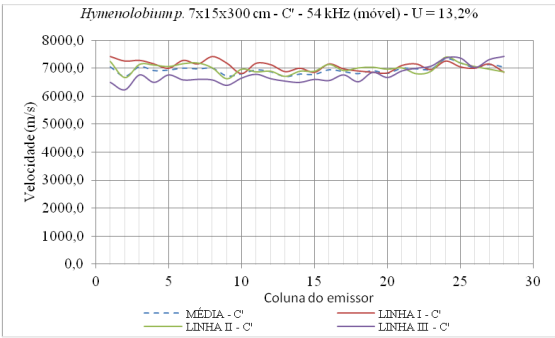


Figura 97 – Velocidade longitudinal indireta (móvel) C' - 54 kHz - *Hymenolobium petraeum* 7 cm x 15 cm x 300 cm.



APÊNDICE D-2 – Velocidades transversais diretas

Figura 98 – Velocidade transversal direta B-B’ - 200 kHz - *Hymenolobium petraeum* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

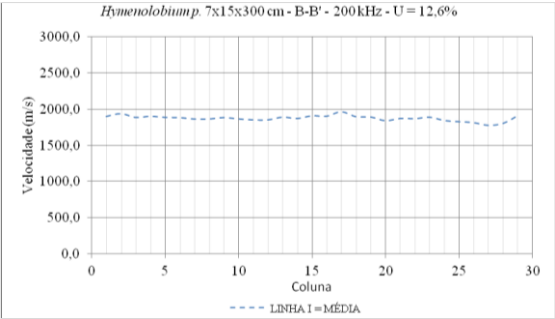


Figura 99 – Velocidade transversal direta B-B’ - 54 kHz - *Hymenolobium petraeum* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

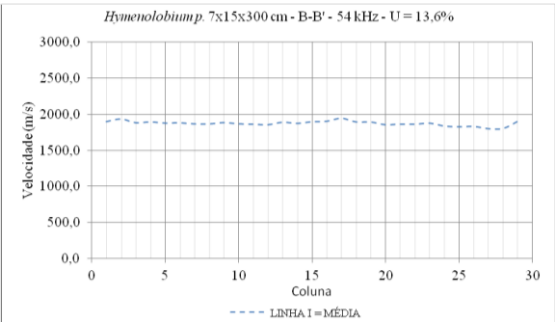


Figura 100 – Velocidade transversal direta C-C’ - 200 kHz - *Hymenolobium petraeum* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

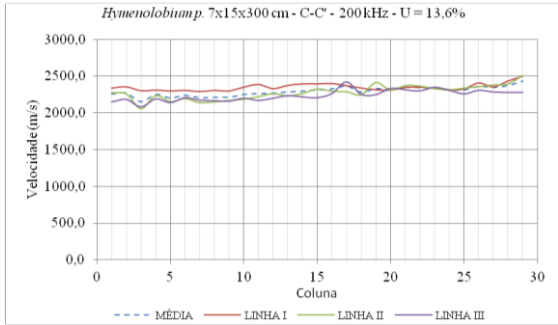
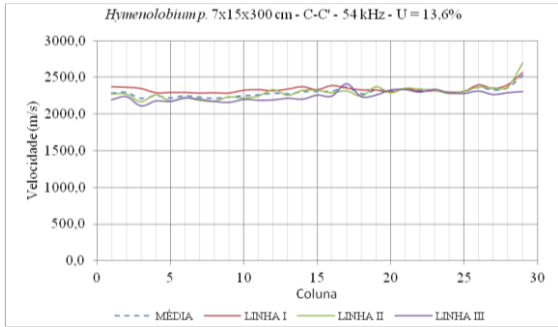


Figura 101 – Velocidade transversal direta C-C’ - 54 kHz - *Hymenolobium petraeum* 7 cm x 15 cm x 300 cm.





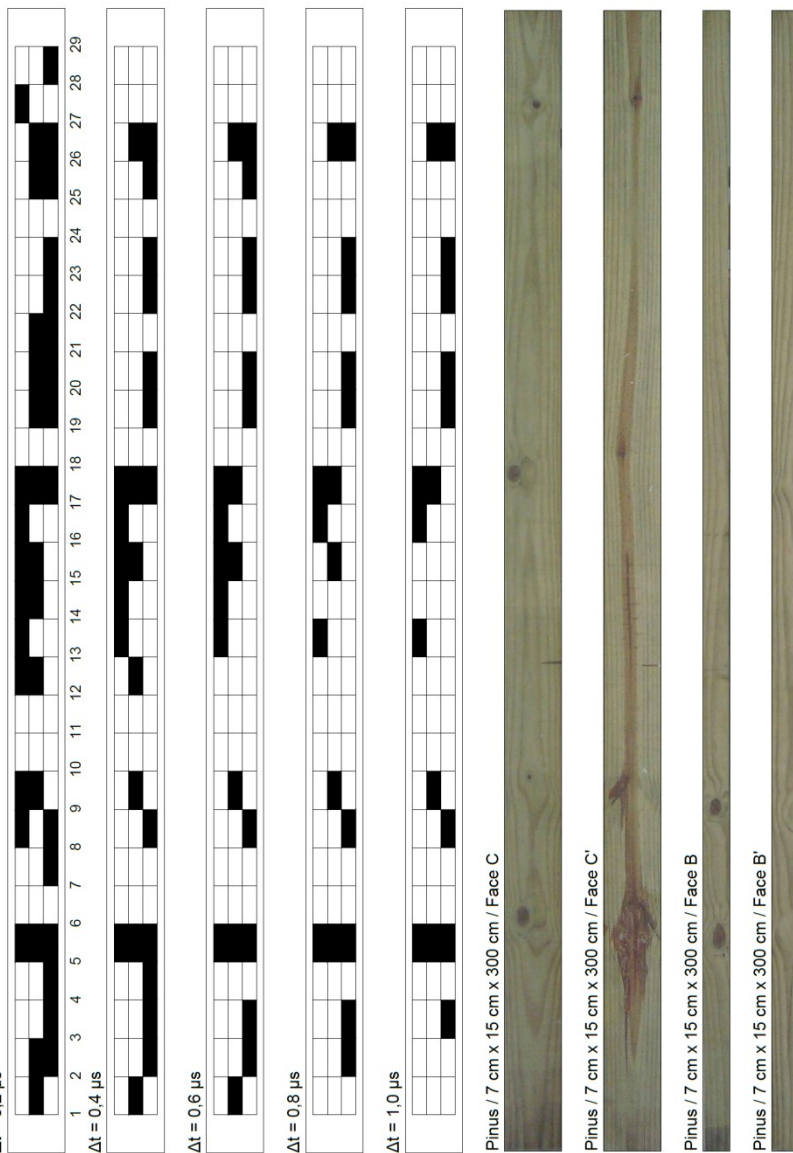
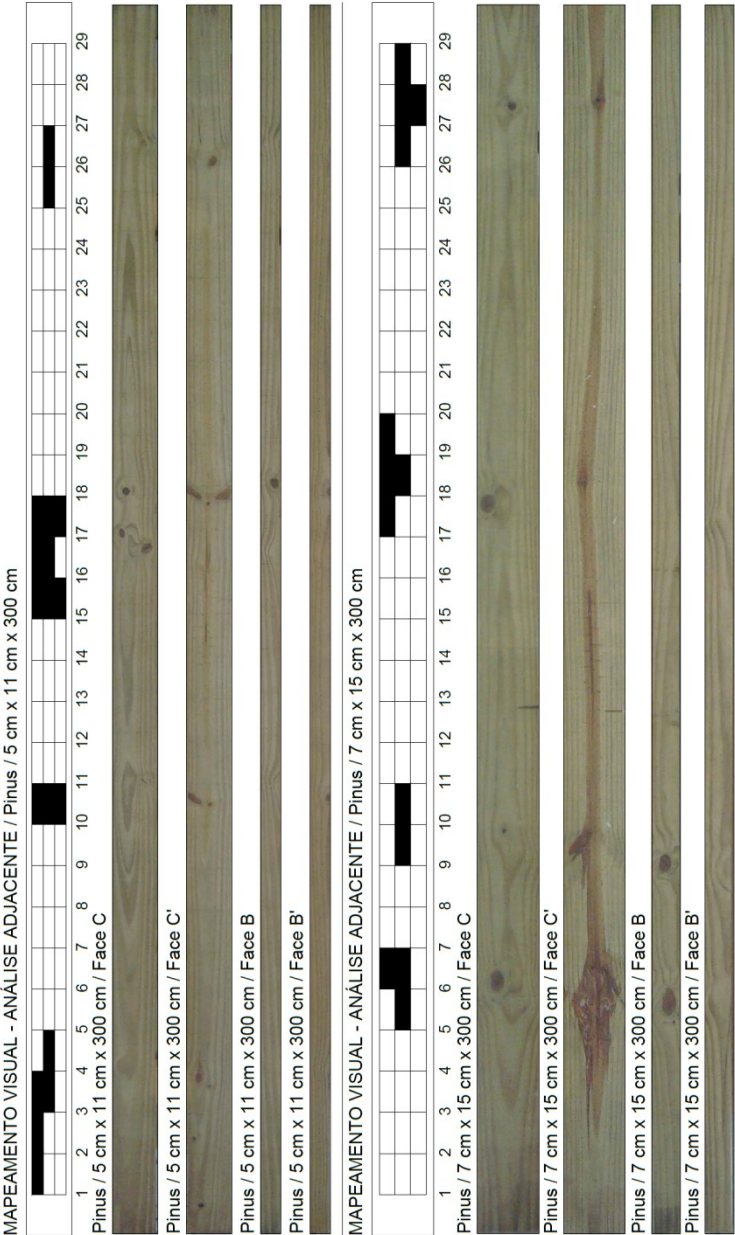
Pinus / 7 cm  
 $\Delta t = 0,2 \mu s$ 



Figura 104 – Mapeamento visual - Análise adjacente - *Pinus elliottii*



APÊNDICE E-2 – Análise das leituras de referência C-C'

Figura 105 – Análise das leituras de referência C-C' - 54 kHz - *Pinus elliottii*  
5 cm x 11 cm x 300 cm.

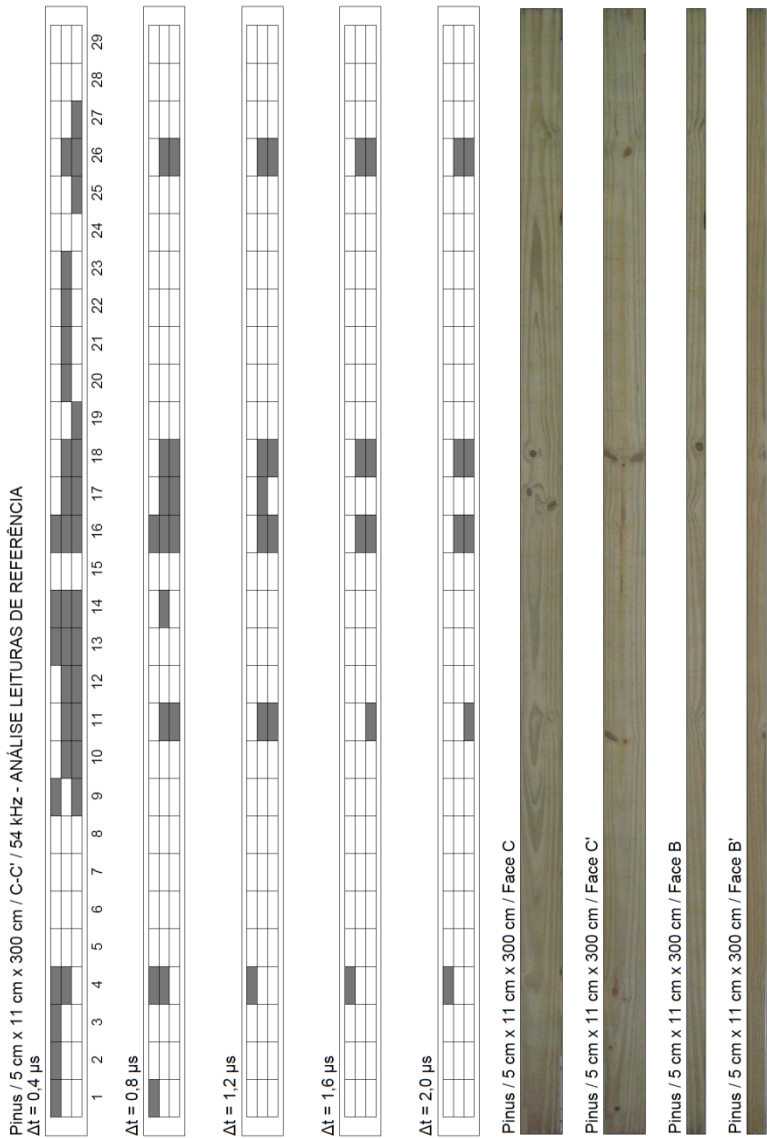


Figura 106 – Análise das leituras de referência C-C' - 54 kHz - *Pinus elliottii* 7 cm x 15 cm x 300 cm.

